



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Trasvase de arena entre playas como medida de gestión costera

Treball realitzat per:

Alberto Caballero Sánchez

Dirigit per:

Juan Pablo Sierra Pedrico

Vicente Gracia García

Tutor extern:

Manuel García-León

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 12 de juny de 2018

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

ABSTRACT

In several occasions actions taken to prevent or reduce coastal erosion do not have the expected effect, leading to worse scenarios instead of solving the original problem. This is the situation along most Spanish coastal regions during last years when structural measures have been implemented instead of considering others with less impact in coastal regions. Nowadays, beach nourishment with sand coming from other beaches is being considered as a better alternative in comparison with the construction of solid structures, both from an ecological and engineering perspective.

However, the sand transfers that are taking place are done without knowledge of the available sand amount on the borrow beach. Only the experience of the coastal management responsible determines the volume of sediment that is extracted. Thus, this amount is very small in comparison with what the beach may actually give away.

This study is focused on determining the sediment available in one of the cells of the Catalan coast and describing which is the most favorable extraction method for this practice. The objective of this analysis is to show that it is possible to know the amount of sediment available on beaches that accumulate during the years, promote solutions to stop coastal erosion that understand the littoral as a system at the scale of a littoral cell or higher and make a first step to analyze the possibility to detect sand reservoirs that can be used as a coastal management measure,

The historical shoreline evolution analysis in the littoral cell Port Ginesta – Port of Barcelona shows that Castelldefels beach has been accumulating sediment during last 14 years with important accretion rates. The study carried out with SWAN and XBeach models show that, considering the current width and beach profile, under the action of extreme events the beach can absorb the impact of waves and protects the areas behind after the event. Therefore, 3 different sand extraction methods are applied: (i) a trench of 40 cm, (ii) a trench of 70 cm and a shoreline retreat to the position occupied in 2004.

Results show that, under the same extreme events, it is possible to extract 58,500 m³ of sand along 2/3 of the initially proposed length by making a trench of 40 cm, 66,000 m³ along 1/3 of the initially proposed length by a trench of 70 cm and 36,740 m³ in the case of a shoreline retreat to the position occupied in 2004 along all the length of the proposed beach.

RESUMEN

Las acciones tomadas para prevenir o reducir la erosión de la costa no siempre han tenido el efecto deseado, llevando en muchos casos a problemas importantes en lugar de resolver el original. Esto es lo que ha sucedido en muchas zonas del litoral español a lo largo de los años, donde se ha optado por implementar medidas estructurales en lugar de otras de menor impacto sobre la costa. En la actualidad, el trasvase de arena entre playas está comenzando a ser considerado como una mejor alternativa en comparación con la construcción de estructuras, tanto desde una perspectiva ecológica como de ingeniería.

Sin embargo, los trasvases de arena que se están llevando a cabo se realizan sin conocimiento alguno de la cantidad de arena disponible en la playa de préstamo. Únicamente la experiencia de los responsables en materia de gestión costera es el factor que determina el volumen de sedimento que se llega a extraer, siendo éste una cantidad muy pequeña de lo que en realidad la playa está dispuesta a ceder.

Este estudio se enfoca en determinar el sedimento disponible en una de las celdas del litoral catalán y describir cuál es el método de extracción más favorable para este tipo de práctica. El objetivo de este análisis es poner de manifiesto que es posible conocer la cantidad de sedimento disponible en playas en las que se acumula y optimizar la configuración de la extracción. Con ello se pueden promover las soluciones más adecuadas para evitar la erosión del litoral que lo entienden como un sistema a escala de celda litoral o superior y dar un primer paso para analizar la posibilidad de detectar bancos de arena que puedan ser utilizados como medida de gestión costera.

El análisis histórico de la evolución de la línea de orilla en la célula litoral Port Ginesta – Puerto de Barcelona pone de manifiesto que la playa de Castelldefels ha estado acumulando sedimento durante los últimos 14 años y con importantes tasas de acreción. El estudio realizado con los modelos SWAN y XBeach han determinado que, considerando la actual anchura y perfil de playa, bajo la acción de eventos extremos la playa es capaz de absorber con holgura el impacto del oleaje y proteger las áreas urbanas posteriores. Por tanto, se aplican 3 patrones de extracción de arena: (i) una zanja de 40 cm, (ii) una zanja de 70 cm y (iii) un retroceso de la línea de orilla a la posición que ocupaba en el 2004.

Los resultados muestran que, teniendo en cuenta los mismos eventos extremos, es posible extraer 58.500 m³ de arena a lo largo de 2/3 de la longitud inicialmente propuesta realizando una zanja de 40 cm, una cantidad igual a 66.000 m³ a lo largo de 1/3 de la longitud inicialmente propuesta mediante una zanja de 70 cm y 36.750 m³ en el caso del retroceso de la línea de orilla hasta la posición que ocupaba en el año 2004 a lo largo de todo el tramo considerado.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	i
ÍNDICE DE TABLAS	v
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN	8
1.2. OBJETIVOS	9
1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	9
2. ÁREA DE ESTUDIO.....	10
2.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO	10
2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA	16
2.3. RÉGIMEN EXTREMAL DE OLEAJE.....	16
2.3.1. PERÍODO DE RETORNO.....	17
2.3.2. DIRECCIONES PREDOMINANTES DEL OLEAJE	17
2.3.3. ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE Y PERÍODO PICO	18
2.4. NIVEL MEDIO DEL MAR.....	20
2.5. IMPACTO SOBRE LA PLAYA	21
3. ANÁLISIS HISTÓRICO DE LA EVOLUCIÓN DE LA COSTA	22
3.1. METODOLOGÍA.....	22
3.1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	22
3.1.2. DATOS DISPONIBLES.....	22
3.1.3. PRECISIÓN DE LOS DATOS	23
3.1.4. MÉTODO DE ANÁLISIS	24
3.1.5. ESQUEMA DEL ESTUDIO	25
3.2. RESULTADOS.....	26
3.2.1. RESULTADOS A ESCALA DE CELDA LITORAL	27
3.2.2. RESULTADOS EN LA PLAYA DE LES BOTIGUES DE SITGES	28
3.2.3. RESULTADOS EN LA PLAYA DE CASTELLDEFELS	29
3.2.4. RESULTADOS EN LA PLAYA DE GAVÁ.....	30
3.2.5. RESULTADOS EN LA PLAYA DE VILADECANS.	31
3.2.6. RESULTADOS EN LA PLAYA DE EL PRAT	32
3.3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	33
3.4. CONCLUSIONES.....	37
4. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA MORFOLÓGICA DE LA PLAYA FRENTE TEMPORALES.....	38
4.1. METODOLOGÍA.....	38
4.1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	38
4.1.1. ANÁLISIS HIDRODINÁMICO.....	40

4.1.2. ANÁLISIS MORFODINÁMICO	41
4.1.3. DATOS DISPONIBLES.....	43
4.1.4. MODELO SWAN	45
4.1.4.1 ENTRADAS DEL MODELO	48
4.1.4.2. CONDICIONES DE CONTORNO.....	48
4.1.4.3. SALIDAS DEL MODELO.....	49
4.1.4.4. POSTPROCESO	49
4.1.4.5. ESQUEMA DEL MODELO	50
4.1.5. MODELO XBEACH	50
4.1.5.1. ENTRADAS DEL MODELO	56
4.1.5.2. CONDICIONES DE CONTORNO.....	56
4.1.5.3. SALIDAS DEL MODELO.....	56
4.1.5.4. POSTPROCESO	57
4.1.5.5. ESQUEMA DEL MODELO	57
4.1.6 ESQUEMA DEL ESTUDIO	57
4.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS HIDRODINÁMICO	60
4.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS MORFOLÓGICO	62
4.3.1. SITUACIÓN ACTUAL	63
4.3.2. MÉTODO DE EXTRACCIÓN “A”: ZANJA DE 40 cm	65
4.3.3. MÉTODO DE EXTRACCIÓN “B”: ZANJA DE 70 cm	69
4.3.4. MÉTODO DE EXTRACCIÓN “C”: RETROCESO DE LA LÍNEA DE ORILLA	73
4.4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	77
4.4.1. INTRODUCCIÓN.....	77
4.4.2. ANÁLISIS HIDRODINÁMICO.....	77
4.4.3. ANÁLISIS MORFOLÓGICO.....	79
5. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	84
6. FUTUROS CAMPOS DE INVESTIGACIÓN.....	87
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de los espigones sobre las playas. Fuente: De la Peña 2007.	2
Figura 2. Playas de Barcelona con espigones (Vila Olímpica-Diagonal Mar).....	2
Figura 3. Diques exentos y formación de tómbolos en las playas de Sitges.	3
Figura 4. Costa de Mataró cercana al Puerto.	3
Figura 5. Ampliación de la Figura 4. Dique de protección de las vías del tren frente al oleaje.....	3
Figura 6. Plantación de carrizo en las dunas de la playa de Gavá. Fuente: AMB.....	4
Figura 7. Actuación en el puerto de Arenys de Mar. Zona de dragado en rojo y zona de vertido en naranja. Fuente: SENER 2010.	5
Figura 8. Trasvase de arena realizado en Tavernes de la Vallidigna (Valencia). Fuente: MAPAMA. .	5
Figura 9. Ejemplo de un cambio en la gestión costera en la playa de Compostela: se retiran los espigones y se mantiene la playa gracias a aportaciones de arena. Fuente: Van Rijn (2014). ...	6
Figura 10. Ubicación de la zona de estudio.....	10
Figura 11. Cambio de orientación de la costa entre las playas de Castelldefels y Viladecans.....	11
Figura 12. Ubicación de las playas de Les Botigues de Sitges y Castelldefels.	11
Figura 13. Imagen A de la Figura 12. Playa de Les Botigues de Sitges (2010). Fuente: Visitsitges.com	12
Figura 14. Imagen B de la Figura 12. Playa de Castelldefels en su tramo Sur (2010). Fuente: Eltiempo.es.....	12
Figura 15. Imagen C de la Figura 12. Playa de Castelldefels en su tramo Norte (2010). Fuente: Eltiempo.es.....	12
Figura 16. Cuerdas que protegen las dunas del litoral de Castelldefels. Fuente: AMB.....	12
Figura 17. Playa de Gavá. Fuente: Elaboración propia con Google Earth.	13
Figura 18. Imagen A de la Figura 17. Playa de Gavá en su tramo central (2010). Fuente: Eltiempo.es.....	13
Figura 19. Imagen B de la Figura 17. Playa de Gavá en su tramo norte (2010). Fuente: Eltiempo.es.....	13
Figura 20. Dunas de la playa de Gavá. Fuente: AMB.....	13
Figura 21. Playa de Viladecans.	14
Figura 22. Imagen A de la Figura 21. Playa de Viladecans en su tramo sur (2010). Fuente: MAPAMA.	14
Figura 23. Imagen B de la Figura 21. Playa de Viladecans en su tramo norte (2010). Fuente: MAPAMA.	14
Figura 24. Banco de arena que taponan la salida de una riera en la playa de Viladecans (2018). Fuente: CCMA.	14
Figura 25. Playa de El Prat en el año 2001.	15
Figura 26. Playa de El Prat en el año 2017.	15

Figura 27. Transporte longitudinal de sedimento neto (LST), en m ³ /año, a lo largo de la celda litoral. Fuente: Gracia, 2010.	16
Figura 28. Ubicación de la Boya de Barcelona II. Fuente: Puertos del Estado.	17
Figura 29. Rosa de altura de ola según las direcciones dominantes. Fuente: Puertos del Estado. .	17
Figura 30. Direcciones predominantes del oleaje.	18
Figura 31. Parámetros del oleaje. Fuente: Masmar.	18
Figura 32. Régimen extremal escalar de oleaje. Fuente: Puertos del Estado.	18
Figura 33. Régimen medio de Hs anual para la dirección NE. Fuente: Puertos del Estado.	19
Figura 34. Ortofoto del delta del río Llobregat en el año 2002.	22
Figura 35. Ortofoto del delta del río Llobregat en el año 2006.	22
Figura 36. Ejemplo de la información recopilada antes de utilizar DSAS. Fuente: USGS.	24
Figura 37. Transectos y puntos de medida de la tasa de evolución en DSAS. Fuente: USGS.	25
Figura 38. Evolución de la línea de orilla en la celda litoral “Port Ginesta – Puerto de Barcelona” entre el 2004 y el 2017.	27
Figura 39. Imagen 1 de la Figura 38. Transectos de la evolución de la línea de orilla entre los años 2004 y 2017 en la playa de Les Botigues.	28
Figura 40. Imagen 2 de la Figura 38. Transectos de evolución de la línea de orilla entre los años 2004 y 2017 en la playa de Castelldefels.	29
Figura 41. Imagen 3 de la Figura 38. Transectos de evolución de línea de orilla entre los años 2004 y 2017 en la playa de Gavá.	30
Figura 42. Imagen 4 de la Figura 38. Transectos de evolución de la línea de orilla entre los años 2004 y 2017 en la playa de Viladecans.	31
Figura 43. Imagen 5 de la Figura 38. Transectos de evolución de línea de orilla entre los años 2004 y 2017 en la playa de El Prat.	32
Figura 44. Diferentes tramos diferenciados en la playa de Castelldefels según la tasa de acreción que presentan. Tramo 1 con una tasa de acreción superior a 1.5 metros/año y Tramo 2 con una tasa inferior a 1.5 metros/año.	34
Figura 45. Posición de la sección representada en la Figura 46 en la playa de Castelldefels.	34
Figura 46. Evolución del ancho de playa entre los años 2004 y 2017 en la playa de Castelldefels.	34
Figura 47. Posición de las secciones representadas en las Figuras 48 y 49.	35
Figura 48. Evolución del ancho de playa entre los años 2004 y 2017 en la Playa de Viladecans.	36
Figura 49. Evolución del ancho de playa entre los años 2004 y 2017 en la playa de Viladecans.	36
Figura 50. Ubicación del lugar de extracción de arena en la playa de Castelldefels.	37
Figura 51. Descripción de las diferentes zonas en regiones costeras.	39
Figura 52. Delimitación del área definida por el final de las dunas y un límite situado a 15 m de la orilla.	41
Figura 53. Sección del perfil de playa resultante realizando una zanja de 40 cm.	41
Figura 54. Sección del perfil de playa resultante realizando una zanja de 70 cm.	42
Figura 55. Delimitación del área comprendida entre la línea de orilla actual (azul) y la línea de orilla del año 2004 (rojo).	42

Figura 56. Perfil de playa resultante con un retroceso de la línea de orilla.....	42
Figura 57. Localización de las mallas computacionales utilizadas en los modelos SWAN y XBeach.	44
Figura 58. Representación de las mallas de cálculo de los modelos SWAN y XBeach de la Figura 53.	45
Figura 59. Imagen 1 de la Figura 58. Ampliación de la zona con mayor densidad de malla.	45
Figura 60. Localización de los contornos del modelo SWAN (aristas de color verde).	49
Figura 61. Ubicación de los outputs del modelo SWAN.....	49
Figura 62. Esquema general de funcionamiento del modelo SWAN.	50
Figura 63. Representación global de XBeach. Fuente: Smit et al., 2010.	58
Figura 64. Diagrama de la metodología propuesta para estudiar la respuesta morfológica del Tramo 1 de la playa de Castelldefels, la cual se basa en los modelos SWAN y XBeach.	59
Figura 65. Representación de los resultados del análisis hidrodinámico.....	60
Figura 66. Distribución de la altura de ola significativa (m) en toda la celda litoral Port Ginesta – Puerto de Barcelona (superior) y en el Tramo 1 de la playa de Castelldefels (inferior), considerando todas las direcciones de procedencia (Dir) del oleaje (S, SE, SSE, SSW), período de retorno (T_R) de 25 años y el escenario III de sobreelevación del nivel del mar (SNM).	61
Figura 67. Ubicación de las secciones en las que se representan los perfiles de playa.	62
Figura 68. Las figuras muestran el área inundada (izquierda) y la variación espacial del fondo marino (derecha), en m, provocada por la erosión (valores negativos) y la acumulación (valores positivos) de sedimento al final de la simulación ($t=6h$) en las condiciones actuales del Tramo 1 de la playa de Castelldefels para todas las direcciones de procedencia, período de retorno de 25 años y sobre elevación del nivel del mar igual a 0,88 m.....	64
Figura 69. Las figuras muestran el área inundada (izquierda) y la variación espacial del fondo marino (derecha), en m, provocada por la erosión (valores negativos) y la acumulación (valores positivos) de sedimento al final de la simulación ($t=6h$) en las condiciones posteriores a la extracción de arena según el método “A”, para todas las direcciones de procedencia, Períodos de retorno de 25 años y sobre elevación del nivel del mar igual a 0,88 m.....	66
Figura 70. Perfiles de playa obtenidos en las Secciones 1 y 2 en las condiciones posteriores al método de extracción “A”, para todas las direcciones de procedencia, períodos de retorno de 25 años y sobre elevación del nivel del mar igual a 0,88 m.....	67
Figura 71. Diferencias en términos de erosión y acumulación cuando se compara la respuesta de la playa en las condiciones actuales y la respuesta obtenida en las condiciones posteriores al método de extracción “A”, al final de la simulación ($t=6h$), para todas las direcciones de procedencia, con períodos de retorno de 25 años y sobre elevación del nivel del mar igual a 0,88 m.	68
Figura 72. Las figuras muestran el área inundada (izquierda) y la variación espacial del fondo marino (derecha), en m, provocada por la erosión (valores negativos) y la acumulación (valores positivos) de sedimento al final de la simulación ($t=6h$) en las condiciones posteriores a la extracción de	

arena según el método "B", para todas las direcciones de procedencia, con períodos de retorno de 25 años y sobreelevación del nivel del mar igual a 0,88 m.....	70
Figura 73. Perfiles de playa obtenidos en las Secciones 1 y 2 en las condiciones posteriores al método de extracción "B", para todas las direcciones de procedencia, períodos de retorno de 25 años y sobreelevación del nivel del mar igual a 0,88 m.....	71
Figura 74. Diferencias en términos de erosión y acumulación cuando se compara la respuesta de la playa en las condiciones actuales y la respuesta obtenida en las condiciones posteriores al método de extracción "B", al final de la simulación (t=6h), para todas las direcciones de procedencia, con períodos de retorno de 25 años y sobreelevación del nivel del mar igual a 0,88 m.	72
Figura 75. Las figuras muestran el área inundada (izquierda) y la variación espacial del fondo marino (derecha), en m, provocada por la erosión (valores negativos) y la acumulación (valores positivos) de sedimento al final de la simulación (t=6h) en las condiciones posteriores a la extracción de arena según el método "C", para todas las direcciones de procedencia, con períodos de retorno de 25 años y sobreelevación del nivel del mar igual a 0,88 m.	74
Figura 76. Perfiles de playa obtenidos en las Secciones 1 y 2 en las condiciones posteriores al método de extracción "C", para todas las direcciones de procedencia, períodos de retorno de 25 años y sobreelevación del nivel del mar igual a 0,88 m.....	75
Figura 77. Diferencias en términos de erosión y acumulación cuando se compara la respuesta de la playa en las condiciones actuales y la respuesta obtenida en las condiciones posteriores al método de extracción "C", al final de la simulación (t=6h), para todas las direcciones de procedencia, con períodos de retorno de 25 años y sobreelevación del nivel del mar igual a 0,88 m.	76
Figura 78. Aparición de gradientes longitudinales de altura de ola (Dir=SE, T _R =25 años, SNM=0,88 m).	78
Figura 79. Zona que sufre mayor impacto bajo la acción del oleaje (Dir=SE, T _R =25 años, SNM=0,88 m).	79
Figura 80. Aparición de corrientes de retorno (Dir=SE, T _R =25 años y SNM=0,88 m).	80
Figura 81. Corrientes de overwash en tormentas procedentes del SSW, T _R =25 años y SNM=0,88 m.	81
Figura 82. Deposición de arena en la zona de extracción producida por el washover en tormentas procedentes del SSW, T _R =25 años y SNM=0,88 m.	81
Figura 83. Aparición de nuevas zonas que han quedado inundadas en tormentas procedentes del SSW, T _R =25 años y SNM=0,88 m.	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recopilación de trasvases de arena realizado en el litoral español. Fuente: MAPAMA.	7
Tabla 2. División en celdas litorales de la costa en la provincia de Barcelona.	10
Tabla 3. Valores de altura de ola obtenidos a partir de la Figura 32.	18
Tabla 4. Obtención de los coeficientes de direccionalidad.	20
Tabla 5. Resultados de altura de ola y período pico por direcciones.	20
Tabla 6. Variación del nivel medio del mar.	20
Tabla 7. Pendientes medias de las playas. Fuente: Libre verd de la costa catalana (CIIRC, 2010).	23
Tabla 8. Errores en la determinación horizontal de la línea de orilla.	24
Tabla 9. Errores estimados en la posición de la línea de orilla para cada playa.	24
Tabla 10. Leyenda de la Figura 38.	27
Tabla 11. Evolución de la línea de la orilla en los períodos 1957 – 2004 y 2004 – 2017 en la playa de Les Botigues de Sitges. Fuente: Libre verd de la costa catalana y elaboración propia con DSAS.	28
Tabla 12. Evolución de la línea de la orilla en los períodos 1957 – 2004 y 2004 – 2017 en la playa de Castelldefels. Fuente: Libre verd de la costa catalana y elaboración propia con DSAS.	29
Tabla 13. Evolución de la línea de la orilla en los períodos 1957 – 2004 y 2004 – 2017 en la playa de Gavá. Fuente: Libre verd de la costa catalana y elaboración propia con DSAS.	30
Tabla 14. Evolución de la línea de la orilla en los períodos 1957 – 2004 y 2004 – 2017 en la playa de Viladecans. Fuente: Libre verd de la costa catalana y elaboración propia con DSAS. ...	31
Tabla 15. Evolución de la línea de la orilla en los períodos 1957 – 2004 y 2004 – 2017 en la playa de El Prat. Fuente: Libre verd de la costa catalana y elaboración propia con DSAS.	32
Tabla 16. Importancia de los procesos que afectan a la evolución de las olas en aguas oceánicas y costeras. Fuente: Battjes, 1994.	40
Tabla 17. Escenarios hidrodinámicos considerados.	41
Tabla 18. Escenarios morfodinámicos.	43
Tabla 19. Fenómenos considerados en el término fuente S.	48
Tabla 20. Ubicación de los outputs generados por SWAN.	49
Tabla 21. Diámetro de sedimento en la playa de Castelldefels. Fuente: Libre verd de la costa catalana (CIIRC, 2010).	56

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años la costa catalana ha sufrido grandes cambios debido a la construcción de puertos y otras estructuras artificiales. Estas infraestructuras costeras han supuesto una barrera al transporte de sedimento a lo largo del litoral, provocando una acreción de las playas en unas zonas determinadas y una fuerte erosión en otras, acompañadas con el correspondiente impacto social y ambiental. Además, otros tipos de infraestructuras fluviales, como las presas, provocan una reducción del aporte de sedimentos que a través de los ríos deberían llegar al mar y alimentar a las playas.

Esta erosión combinada con la acción de los temporales puede provocar graves problemas de seguridad en las zonas cercanas a la costa y un gran impacto económico dados los destrozos que puedan producirse.

Para mitigar estos efectos, el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), encargado de la gestión del Dominio Público Marítimo Terrestre, realiza una serie de intervenciones para evitar la erosión de la costa y asegurar su función de protección y recreacional. La misma playa, si tiene un ancho lo suficientemente grande, es siempre la mejor manera de atenuar el impacto del oleaje, en comparación con las obras de defensa. Es por ello por lo que la gran mayoría de las actuaciones ejecutadas habitualmente buscan detener la recesión de la playa y/o regenerarla, devolviéndole las condiciones naturales.

La clasificación más típica de las estructuras de defensa y protección que puede hacerse hoy en día consiste, por un lado, en las medidas Estructurales y, por el otro, las No Estructurales. Las primeras son aquellas en las que se emplean estructuras con el objetivo de detener el retroceso de la costa y/o forzar el depósito de sedimento, mientras que con las No Estructurales no se emplean estructuras para obtener los mismos objetivos. A continuación, se muestran las técnicas que forman parte de cada una de las medidas.

Estructurales

- Espigones
- Diques longitudinales
- Diques exentos

No estructurales

- Dunas y vegetación
- Alimentación:
 - Artificial
 - Trasvase arena

MEDIDAS ESTRUCTURALES

A lo largo de todo el litoral español se pueden identificar una gran cantidad de playas que están formadas por uno o varios espigones. Son estructuras lineales perpendiculares a la orilla que retienen total o parcialmente el transporte de arena longitudinal a lo largo de la costa y se construyen con la intención de estabilizar las playas. El espigón retiene el sedimento aguas arriba de la obra (con respecto a la dirección de la deriva litoral), pero reduce el suministro de arena aguas abajo. Esta medida permite solucionar el problema de la erosión en una zona determinada, pero lo vuelve a generar en las playas siguientes, debido a su erosión creciente en el tiempo y el espacio, tal y como se muestra en la Figura 1.

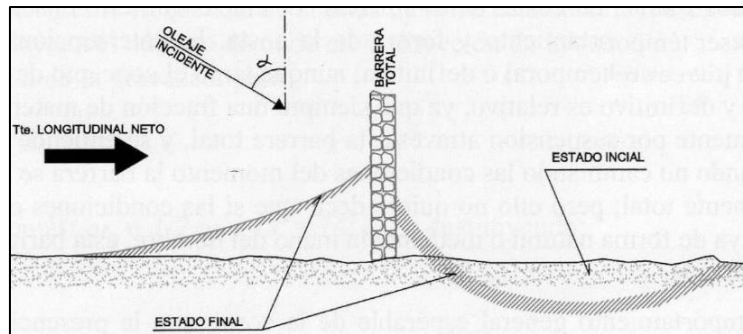


Figura 1. Efecto de los espigones sobre las playas. Fuente: De la Peña 2007.

Para tratar de paliar estos efectos, es normal encontrarse en las playas varios espigones en paralelo hasta llegar a un cambio en la morfología del litoral o a un puerto que, al fin y al cabo, también son una trampa para el paso de sedimento, como puede verse en la Figura 2.



Figura 2. Playas de Barcelona con espigones (Vila Olímpica-Diagonal Mar).

Aun así, los espigones no garantizan que la playa sea estable y vaya a mantenerse siempre en las mismas condiciones. Cuando llega un temporal de dimensiones considerables, las olas arrastran el sedimento mar adentro y éste puede tardar del orden de semanas o meses en volver a la orilla. Al estar el transporte longitudinal limitado por culpa de las estructuras de contención, el transporte transversal es el único que alimenta la playa.

En consecuencia, es muy frecuente que estas playas acaben alimentándose artificialmente de arena procedente de otros lugares, ya que puede que la playa no tenga el ancho necesario lo suficientemente rápido como para poder proteger la costa del siguiente temporal o dar cabida a los bañistas cuando llega el bueno tiempo.

Este es el caso, como muchos otros, que se da en las playas de Barcelona, donde los espigones al final acaban realizando la función de contener la arena que se vierte de manera artificial anualmente para tener un ancho de playa mayor al que se tiene antes de que llegue el verano.

Otro tipo de medida estructural son los diques exentos, que se construyen mar adentro, paralelamente a la línea de costa. Su función es la de interceptar las olas antes de que lleguen a la orilla. El oleaje se difracta en los extremos de la estructura, cambiando su dirección de propagación y su altura. De esta manera interrumpen el transporte de arena, tanto el longitudinal como sobre todo el transversal. Dependiendo de su longitud y de la distancia a la costa, el dique puede llegar a retener a ambos lados la mayoría del sedimento transportado, provocando la generación de un tómbolo (Figura 3). Una vez formado el tómbolo, el comportamiento frente a la dinámica litoral es similar al de los espigones.



Figura 3. Diques exentos y formación de tómbolos en las playas de Sitges.

La siguiente medida estructural es el dique longitudinal. Éste se construye en la propia línea de costa o en la parte posterior de la playa y tienen como objetivo proteger del oleaje y actuar como muro de las zonas detrás de él. Esta técnica se emplea cuando se sabe que la playa no es lo suficientemente ancha como para absorber los efectos del temporal o cuando los problemas de erosión son demasiado grandes y se pierde toda esperanza de mantenerla.



Figura 4. Costa de Mataró cercana al Puerto.

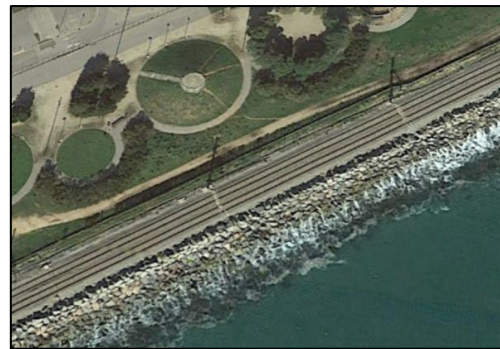


Figura 5. Ampliación de la Figura 4. Dique de protección de las vías del tren frente al oleaje.

En las Figuras 4 y 5 se puede ver que como consecuencia de la erosión provocada por el puerto de Mataró y por la fuerte dinámica litoral en la zona, se ha perdido por completo la arena y se ha tenido que instalar un dique longitudinal para proteger las vías del tren.

Las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM) contienen una serie de indicaciones que ayudan al diseño y ejecución de los 3 tipos de medidas estructurales vistos hasta ahora. De modo son medidas de las que se tiene un gran conocimiento y no tienen un elevado grado de dificultad en su implementación. Resulta complicado no encontrarse a lo largo del litoral playas que no contengan alguno de los elementos descritos anteriormente, así que es difícil pensar que los problemas que puedan seguir existiendo relacionados con la erosión puedan ser solucionados con la continua implementación de alguna de estas técnicas.

Hasta ahora se ha visto que las medidas estructurales pueden llegar a solucionar el problema en zonas concretas, pero lo vuelven a generar aguas abajo de las estructuras. Además, provocan un impacto visual considerable y acaban con la morfología natural de las playas. Asimismo, pueden generar un mayor impacto ambiental, ya que al restringir la circulación del agua contribuyen a deteriorar la calidad de la misma.

MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

Las medidas no estructurales son las que en la actualidad están teniendo una mayor relevancia. Son actuaciones que, en su mayoría, pretenden solucionar los problemas de erosión y protección de la costa respetando el medio ambiente, mejorando la calidad visual del paisaje y potenciando la biodiversidad.

Las dunas necesitan cuatro elementos para poder formarse. El primero de todos es que la dinámica del mar permita que llegue arena a la playa. Después necesita que el viento sea capaz de transportar grandes cantidades de arena a la zona posterior de la playa y que ésta esté seca. También que haya carrizo capaz de retener la arena (Figura 6) y, por último, espacio para ellas.



Figura 6. Plantación de carrizo en las dunas de la playa de Gavá. Fuente: AMB.

Sólo unas playas en concreto de la costa catalana reúnen tales condiciones. El desarrollo urbanístico cercano a la costa o un aporte natural de arena insuficiente son los dos motivos principales por los que la gran mayoría de las playas no son lo suficientemente anchas ni tienen la arena necesaria como para albergarlas.

Por otro lado, la alimentación de playas es una práctica que consiste en añadir una gran cantidad de arena procedente del fondo del mar o de otras playas para incrementar la anchura y combatir la erosión. No es una solución a largo plazo, pero la duración de la arena vertida en la playa de destino depende del tipo de sedimento que se utilice. El material granular óptimo para alimentar una playa es aquél que tiene una granulometría igual o superior y unas características físicas y químicas iguales a las que tiene la arena de la playa en cuestión. Si no se cumplen tales condiciones, el material depositado no será estable ni en cortos períodos de tiempo y los temporales que lleguen a la orilla lo devolverán al fondo del mar, donde se depositará juntamente con el de las mismas características.

Normalmente la arena extraída del fondo del mar no tiene las mismas propiedades que la de la orilla, principalmente porque el grano del fondo del mar es mucho más fino. Por este motivo este tipo de actuaciones se realizan con gran frecuencia y necesitan una elevada inversión. Sólo en el año 2016 el Gobierno se gastó en torno a 10 millones de euros en echar arena en las playas españolas, dinero que según muchos expertos en materia de gestión costera ha sido como “tirar el dinero al mar”.

La extracción de arena del fondo del mar se realiza mediante obras de dragado. Cada vez que la draga se llena, carga miles de metros cúbicos de arena y arrasa con todo tipo de vida marina que se encuentre a su paso. Las dragas también suelen hacerse en las bocanas de los puertos y en las proximidades de los diques de abrigo, para retirar la arena acumulada y no dificultar la entrada de los buques. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de una actuación como ésta.

Los aspectos ambientales deben ser muy tenidos en cuenta en este tipo de obras y deben cumplir con la legislación ambiental existente. Las praderas de posidonia son una especie característica del mar Mediterráneo. Consisten en una gran masa de plantas marinas que forman grandes praderas donde se desarrolla gran cantidad de vida. Se encuentran entre la línea de orilla y los 40 metros de profundidad. Cumplen una función medioambiental de gran importancia, ya que son sumideros de CO₂ y ayudan a mantener la calidad de las aguas y sobre todo de las costas, además de ser unos indicadores excepcionales de la calidad del agua.



Figura 7. Actuación en el puerto de Arenys de Mar. Zona de dragado en rojo y zona de vertido en naranja.
Fuente: SENER 2010.

Dada su importancia, las obras de dragado deben respetar las áreas ocupadas por la posidonia y otras especies vegetales. A lo largo de toda la costa del mar Mediterráneo podemos encontrar innumerables zonas ocupadas por este tipo de plantas, así como de reservas marinas. En consecuencia, es difícil encontrar puntos de extracción de arena que no vayan a provocar graves impactos medioambientales. Además, hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea la profundidad de extracción (para no afectar a la vegetación), menos parecido será el sedimento a aquél que se encuentra en la orilla y más caro será el dragado.

Finalmente, en el trasvase de arena entre playas se extrae el material de zonas en las que se acumula, ya sea por los cambios en la morfología del litoral, las estructuras de contención de sedimento o los puertos, y se deposita donde hay erosión (Figura 8). Al tratarse de una misma playa o de playas muy cercanas, el tipo de sedimento es el mismo o muy parecido y se adapta mucho mejor al cambio de ubicación. Esto se traduce en que la arena dura más tiempo en la playa y las reposiciones pasan a ser menos frecuentes. Esta medida está en práctica en la actualidad, pero carece de modelos y estudios que respalden la cantidad de arena que se puede llegar a extraer. Hoy en día el método utilizado es el de “prueba y error”, extrayendo volúmenes de arena no muy elevados y de manera progresiva de modo que, y en base a la experiencia, se sabe que la playa podrá responder adecuadamente frente a los temporales. De este modo no se aprovecha todo el potencial que tienen estas zonas en concreto y las cantidades extraídas acaban siendo muy pequeñas.

La gran mayoría de zonas de acumulación donde se practica esta técnica suelen estar próximas a los puertos, aunque también existen casos en los que se ha retirado arena de la acumulación producida en espigones.



Figura 8. Trasvase de arena realizado en Tavernes de la Valldigna (Valencia). Fuente: MAPAMA.

En conclusión, tanto las medidas estructurales como la alimentación de playas tienen consecuencias negativas, pero los expertos están de acuerdo en que la alimentación de playas es preferible por delante de la ejecución de estructuras.

En playas estrechas que sufren las consecuencias de la dinámica litoral, generalmente la erosión es mitigada a través de la alimentación y/o estructuras de contención de sedimento. En algunos países costeros con suficientes recursos, como Estados Unidos, Dinamarca o Holanda, la erosión costera se combate principalmente a través de alimentaciones intensas. Como resultado, la inmensa mayoría de playas en estos países son largas y muy anchas.

En otros lugares con menos recursos económicos, las medidas estructurales son las que más se ejecutan. De este modo se evita o se reduce la alimentación de playas a largo plazo. Sin embargo, generalmente este tipo de estructuras se ven como poco atractivas, ya que son elementos estructurales que acaban con el aspecto natural de las playas. La ineficiencia de muchos de los sistemas de espigones tradicionales como medida de protección de la costa, además de la creciente importancia social por los aspectos medioambientales, recreacionales y valores estéticos, han causado una disminución de este tipo de proyectos. El concepto moderno de paisaje se centra hoy en día en el diseño de playas largas y anchas con un número mínimo de estructuras para así mejorar la apariencia natural de la playa.

Muchos de los países del Mediterráneo, como España e Italia, han empezado a tomar iniciativas para adoptar nuevas políticas de gestión costera que rempazan la idea de enfocar los problemas a pequeña escala por medidas que lo entienden como un sistema a una escala mayor, que considere como mínimo toda la celda litoral (Figura 9) (el concepto de celda litoral se define en el capítulo 2). Estas nuevas medidas consisten en eliminar los espigones que no son efectivos y/o estéticos e introducir la alimentación de arena, mientras se mantienen los espigones principales que actúan como medida de contención para que el sedimento se quede dentro de la playa. Además, también se combinan estas actuaciones con diques exentos sumergidos en mitad de la playa para dar suficiente protección frente al oleaje.



Figura 9. Ejemplo de un cambio en la gestión costera en la playa de Compostela: se retiran los espigones y se mantiene la playa gracias a aportaciones de arena. Fuente: Van Rijn (2014).

Realizando una búsqueda de otras actuaciones que se hayan ejecutado en el litoral español basadas en el trasvase de arena, se elabora la Tabla 1, a partir de la información obtenida en la página web del MAPAMA y de diferentes notas de prensa.

ASPECTOS SOCIALES

El comportamiento hidrodinámico de las playas es algo que no siempre es conocido por la población. En términos generales, existe un gran desconocimiento de cómo funciona la dinámica del litoral. Aun así, se exige a las playas que tengan un ancho adecuado para proporcionar las mejores condiciones cuando llega el verano.

Tabla 1. Recopilación de trasvases de arena realizado en el litoral español. Fuente: MAPAMA.

Ubicación	Volumen del trasvase (m ³)
Playa de Tavernes de la Valldigna (Valencia)	10.000 m ³
Playa La Cagaila (Motril y Salobreña)	126.100 m ³
Playa de Covas (Lugo)	30.000 m ³
Playa de Premià (Barcelona)	60.000 m ³
Cala Salada (Ibiza)	3.000 m ³
Playa de Les Palmeretes (Sueca)	6.500 m ³
Playa del Saler (Valencia)	40.000 m ³
Playa de Gorliz (Bizkaia)	20.000 m ³
Playa Chica (Lanzarote)	10.500 m ³
Playa de San Andrés (Málaga)	5.000 m ³
Playas del sur de Safor y la Goleta de Tavernes (Valencia)	20.700 m ³
Playa de las Canteras (Las Palmas de Gran Canaria)	40.400 m ³
Playa de las Fontanillas (Cádiz)	12.000 m ³
Playas de Rincocnillo, Getares y Palmones (Algeciras)	4.000 m ³
Playa de El Ancón de Carboneras (Almería)	23.000 m ³
Playas de Málaga capital	80.000 m ³

Durante los últimos años los grandes temporales se producen al inicio del otoño y/o cuando acaba el invierno, es decir, cerca de la época de baño. Tras ellos, las playas muestran un perfil propio del invierno: se produce la pérdida de la arena más fina, disminuyendo su ancho. Es en este momento cuando de repente surge una alarma social en los medios de comunicación bajo expresiones del estilo “desaparece la playa de...”, “el mar arrasa con la playa de...”, “el temporal oculta la playa de...”.

Lo que realidad sucede es que, durante los temporales, esta arena se desplaza y forma barras sumergidas paralelas a la orilla, lejos de la playa, que hacen que las olas más grandes rompan más lejos y la playa quede protegida. Posteriormente, la playa va recuperando lentamente la arena perdida a la vez que llega el buen tiempo hasta adoptar su perfil de verano.

El fenómeno de recuperación descrito anteriormente no es tan sencillo como parece. La recuperación de la playa a partir del transporte transversal de sedimento depende en gran parte de las condiciones y frecuencia en la que se han producido los temporales, de la existencia de obstáculos en el transporte longitudinal, y otros factores. En algunas playas, la recuperación se produce de forma natural y a tiempo para recibir en buenas condiciones el verano, pero en otras debe acelerarse este proceso mediante trasvases de arena. Este método requiere de un entendimiento básico de la playa y de la variabilidad de la línea de costa. Las playas a las que se aporta sedimento necesitan de un mantenimiento (realimentación) regular, dado que la playa se irá erosionando con el tiempo debido a la dinámica natural del litoral. De modo que uno de los factores claves es encontrar el sedimento más adecuado para que la frecuencia de alimentación sea la más pequeña posible, una zona en la que se acumule para poder extraerlo y conocer cuánta cantidad se puede extraer, sin ocasionar problemas de estabilidad a la zona de préstamo.

1.1. MOTIVACIÓN

Todo el mundo es consciente de la importancia de las playas y el turismo para la economía española y de las regiones costeras. Dada su importancia, el gobierno invierte una gran cantidad de dinero y efectivos para mantenerlas y asegurar al máximo su función de protección y recreacional. Sobre la mesa del MAPAMA se acumulan decenas de proyectos para impulsar la regeneración de la costa, pero la disminución en las inversiones y la disparidad de criterios sobre las actuaciones a realizar plantean un escenario de incertidumbre sobre las costas catalanas.

Cuando se acerca el buen tiempo es bastante frecuente ver en los medios de comunicación noticias sobre la constante regresión de la costa en varias zonas del litoral, y municipios que se quejan de que sus playas han perdido mucha arena durante los temporales de invierno y no se han recuperado a tiempo para recibir en su máxima plenitud la temporada turística. Además, piden a la administración central actuaciones para que esta situación no vuelva a repetirse y las playas se mantengan estables.

También es común encontrar en la prensa artículos que explican que en una playa se va a verter una cantidad determinada de metros cúbicos de arena para regenerarla. Esta arena puede proceder, tal y como se ha visto con anterioridad, de 2 fuentes principales: el fondo del mar u otras playas. Se sabe del grave impacto ambiental que genera la extracción de arena del fondo del mar y de la poca estabilidad a largo plazo de dicho sedimento. Queda reflejado con los más de 60 millones de euros en regeneraciones de playas que el Gobierno se ha gastado sólo en el litoral catalán y que después han resultado ser ineficaces, según recogen las mismas notas de prensa.

La arena que procede de otras playas en las que se acumula es la que resulta ser la más idónea. De este tipo de regeneración, según varios expertos en materia de gestión costera, se realizan pocos en la actualidad y sin conocimiento exacto de cuánto sedimento se puede extraer de las zonas de acumulación. No se ha hecho hasta la fecha ningún estudio que dé a conocer la cantidad de arena disponible en una playa de modo que ésta pueda realizar su función de protección frente a los temporales después de la extracción. Lo que se ha hecho hasta el momento es extraer pequeñas cantidades progresivamente intentando alterar lo menos posible la playa en cuestión. Siguiendo este procedimiento no se acaba de aprovechar todo el potencial que tienen las zonas en las se acumula.

Por otro lado, durante mucho tiempo los ingenieros han enfocado los problemas en materia de gestión costera desde un punto de vista local y han optado por ejecutar medidas estructurales para evitar la erosión de las playas. Con el tiempo se ha visto que estas actuaciones no eran del todo eficaces y los problemas volvían a aparecer. Además, las áreas próximas a las que se realizaban las obras veían como sus playas se veían afectadas a pesar de situarse a varios kilómetros de distancia.

La dinámica litoral es un sistema complejo que hay que abordarlo como si de un conjunto se tratase, promoviendo proyectos que analicen los problemas de la costa y propongan soluciones que lo entiendan como parte de un sistema de gestión integrado. El fenómeno de erosión y acumulación de sedimento se produce a lo largo de todo el litoral y debe abordarse, como mínimo, a escala de celda litoral.

En consecuencia, para contribuir a una mejor gestión de la costa, surge la idea de realizar un estudio que dé a conocer la cantidad de arena disponible en una playa en la que se produce acumulación, tratando así de promover soluciones que analicen el litoral como un sistema integral, a escala de celda litoral o superior.

1.2. OBJETIVOS

El estudio se basa en dos objetivos clave, que a su vez se dividen en objetivos más concretos:

- Desarrollar una metodología que permita determinar si hay o no sedimento disponible en una de las celdas de litoral catalán, teniendo en cuenta diferentes escenarios. En caso de que lo haya, cuantificar la arena que se puede extraer y describir cuál es el método de extracción más favorable para este tipo de prácticas. Los objetivos específicos son:
 - i. Caracterizar el comportamiento hidrodinámico del área de estudio.
 - ii. Determinar las zonas de erosión y de acumulación.
 - iii. Implementar la metodología propuesta (SWAN y XBeach) en un escenario real.
 - iv. Evaluar la coherencia de los resultados desde cualitativa y cuantitativamente.
- Proporcionar a la comunidad científica y responsables de la gestión costera un caso de estudio que ponga de manifiesto que es posible conocer la cantidad de sedimento disponible en playas en las que se acumula. Los objetivos asociados son:
 - i. Promover las soluciones para evitar la erosión del litoral que lo entienden como un sistema a escala de celda litoral o superior.
 - ii. Desarrollar un método que optimice el gasto de dinero público en actuaciones que sean efectivas para contrarrestar la erosión de la costa a corto/medio plazo.
 - iii. Proporcionar una metodología que permita disminuir el uso de las obras de dragado y el impacto ambiental que generan.
 - iv. Desarrollar un método analítico que permita disminuir el impacto social que generan las playas cuando se acerca la época estival.
 - v. Dar un primer paso para analizar la posibilidad de detectar bancos de arena que puedan ser utilizados como medida de gestión costera.

1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La estructura del presente estudio se divide en los siguientes capítulos:

- (i) En primer lugar, se encuentra un apartado dedicado al área de estudio, donde se presentan y se realiza una breve descripción de las playas de la costa catalana que forman parte del estudio. También se caracterizan los patrones hidrodinámicos y se definen los parámetros que más adelante se utilizarán para medir la respuesta morfológica de las playas frente al oleaje.
- (ii) En segundo lugar, se realiza un análisis histórico de la evolución de la costa en el área de estudio. Este análisis está orientado a determinar las zonas más afectadas por la hidrodinámica de la costa en términos de erosión y acumulación de sedimento, para tener una referencia sobre qué playas es posible realizar la extracción la arena.
- (iii) A continuación, el análisis de la respuesta morfológica de la playa de interés frente a temporales comprende la descripción de la metodología y los programas utilizados (XBeach y SWAN) para analizar cómo la playa responde en las condiciones actuales y las condiciones posteriores a la extracción de arena bajo la acción de eventos extremos de oleaje.
- (iv) Posteriormente se realiza una discusión de los resultados obtenidos en la que se explica si posible aplicar el trasvase de arena entre playas en el dominio de estudio. También se puede encontrar un resumen y las conclusiones, donde se indica la cantidad de arena disponible según los métodos de extracción propuestos.
- (v) Para acabar, se presentan los temas que quedan abiertos tras el análisis llevado a cabo en este estudio y que son futuros campos de investigación que buscan ampliar el conocimiento sobre el trasvase de arena como medida de gestión costera.

2. ÁREA DE ESTUDIO

2.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO

La zona seleccionada para realizar el estudio se encuentra en el delta del río Llobregat y está formada por las playas de les Botigues de Sitges, Castelldefels, Gavá, Viladecans y el El Prat de Llobregat (Figura 10), que configuran la celda litoral “Port Ginesta – Puerto de Barcelona”.

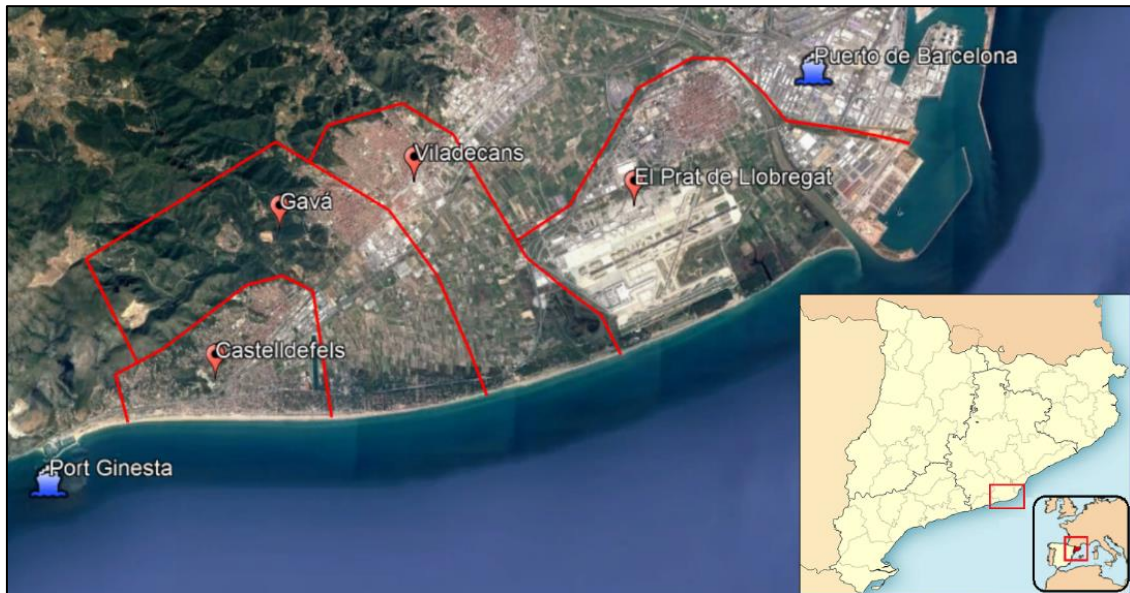


Figura 10. Ubicación de la zona de estudio.

El concepto de “celda litoral” se establece para realizar una sectorización de la costa catalana (Sánchez-Arcilla et al., 2008). Cada una de estas celdas se define partiendo de la existencia de obstáculos para el transporte longitudinal de sedimento, de modo que en cada una de ellas no hay sedimento que entre o salga. Estos obstáculos suelen ser desembocaduras de ríos, puertos o formaciones rocosas. Esta independencia de la dinámica litoral no significa que no tenga ningún tipo de conexión con las celdas adyacentes, sino que ésta puede hacerse a partir de condiciones de contorno.

De acuerdo con este criterio, la costa de la provincia de Barcelona queda dividida según se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. División en celdas litorales de la costa en la provincia de Barcelona.

Número sector	Celda litoral
15	Puerto de Blanes – Puerto de Arenys
14	Puerto de Arenys – Puerto del Balís
13	Puerto del Balís – Puerto de Mataró
12	Puerto de Mataró – Puerto de Premiá
11	Puerto de Premiá – Puerto del Masnou
10	Puerto del Masnou – Puerto de Badalona
9	Ciudad de Barcelona
8	Puerto de Barcelona – Port Ginesta
7	Garraf - Vilanova

El tramo de estudio tiene una longitud de 18 km y aproximadamente a la mitad de su recorrido presenta un arco de transición entre dos alineaciones de la costa claramente diferenciadas. Este

cambio en la morfología es un claro indicador de que las condiciones de oleaje pueden llegar a causar un impacto diferente a un lado y a otro del mismo.

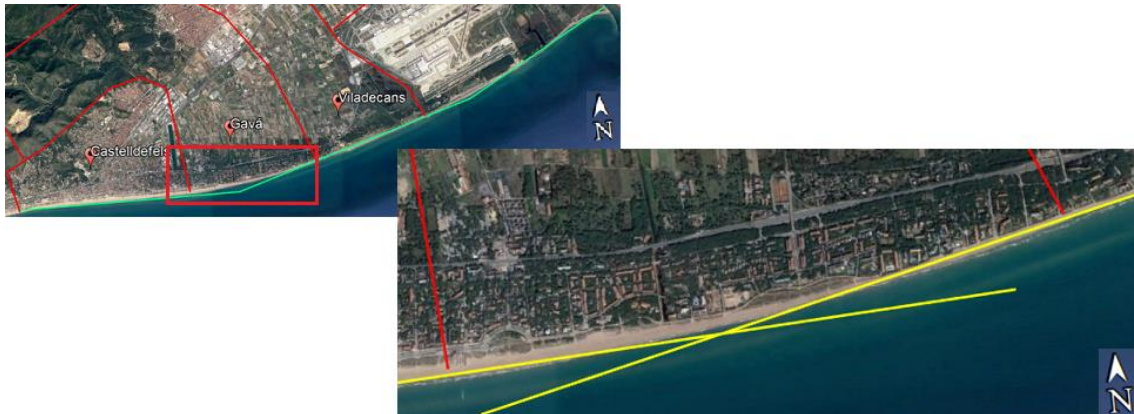


Figura 11. Cambio de orientación de la costa entre las playas de Castelldefels y Viladecans.

En la Figura 11 puede verse como al Sur la playa de Castelldefels tiene una orientación de 90° y al Norte la playa de Viladecans forma un ángulo aproximado de 70° (siempre tomando como referencia el Norte), formando de este modo un ápice. A su vez, la playa de Gavá puede representarse por un tramo Sur con una orientación de 83° y otro al norte con una orientación igual a 76° .

A continuación, se describen las principales características de cada una de estas playas.

- Playa de les Botigues de Sitges

Es la playa semiurbana más grande de todo el municipio de Sitges. Se encuentra justo antes de las costas del Garraf en el núcleo urbano de les Botigues de Sitges, entre el Port Ginesta y la playa de Castelldefels, tal y como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Ubicación de las playas de Les Botigues de Sitges y Castelldefels.

Tiene una longitud de 1,4 km y una anchura promedio de 100 m (Figura 13). Entre sus servicios tiene chiringuitos, tumbonas, duchas, lava pies, pasarelas y acceso hasta la zona de baño para personas con movilidad reducida, que hacen que esta playa tenga un alto nivel medio de ocupación.



Figura 13. Imagen A de la Figura 12. Playa de Les Botigues de Sitges (2010). Fuente: Visitsitges.com

- Playa de Castelldefels

La playa de Castelldefels tiene una extensión de 4,8 km y una anchura media de 150 m. Está situada entre dos sistemas claramente diferenciados: el delta del Llobregat y el macizo del Garraf.



Figura 14. Imagen B de la Figura 12. Playa de Castelldefels en su tramo Sur (2010). Fuente: El tiempo.es



Figura 15. Imagen C de la Figura 12. Playa de Castelldefels en su tramo Norte (2010). Fuente: El tiempo.es

Es una playa de arena fina con una larga tradición turística. Dispone de un Club Náutico y un Club Marítimo y de varias escuelas de vela donde se pueden practicar múltiples actividades acuáticas y náuticas. Además, también se puede encontrar los mismos servicios que en la Playa de Les Botigues. En las Figuras 14 y 15 se observa que entre el paseo marítimo y la línea de la costa existe una zona ocupada por dunas de pequeñas dimensiones en las que se han plantado diferentes especies dunares (Figura 16). El principal objetivo de las mismas es evitar las consecuencias derivadas de los temporales que conllevan muchos daños y gastos durante el invierno, además de proteger y promover los valores ambientales y paisajísticos de la playa.



Figura 16. Cuerdas que protegen las dunas del litoral de Castelldefels. Fuente: AMB.

- Playa de Gavá

La playa de Gavá tiene una longitud de 3,6 km y su anchura es muy variable a lo largo de su recorrido (Figura 17), siendo la máxima de 100 m y la mínima de 34 m.



Figura 17. Playa de Gavá. Fuente: Elaboración propia con Google Earth.

La playa dispone de todos los servicios y equipamientos para proporcionar una oferta de ocio amplia y diversa. También es una playa de gran valor natural, en la que destaca una fisonomía singular con un sistema dunar único y unas pinedas que llegan hasta el mar (Figuras 18 y 19). En este caso, las dunas son más grandes que las vistas en Castelldefels, dado que su ancho de playa es menor y, por tanto, su función de protección es más limitada (Figura 20).



Figura 18. Imagen A de la Figura 17. Playa de Gavá en su tramo central (2010).
Fuente: El tiempo.es



Figura 19. Imagen B de la Figura 17. Playa de Gavá en su tramo norte (2010).
Fuente: El tiempo.es



Figura 20. Dunas de la playa de Gavá. Fuente: AMB.

- Playa de Viladecans

La playa de Viladecans (Figura 21) tiene una longitud de 3 km y una anchura media de 48 m. Se extiende desde la desembocadura de la laguna del Remolar hasta la de la Murtra y está acompañada por un extenso pinar litoral de piño piñonero. Esta playa sin urbanizar es un paraje dunar que conserva comunidades vegetales y animales propias de los arenales costeros.

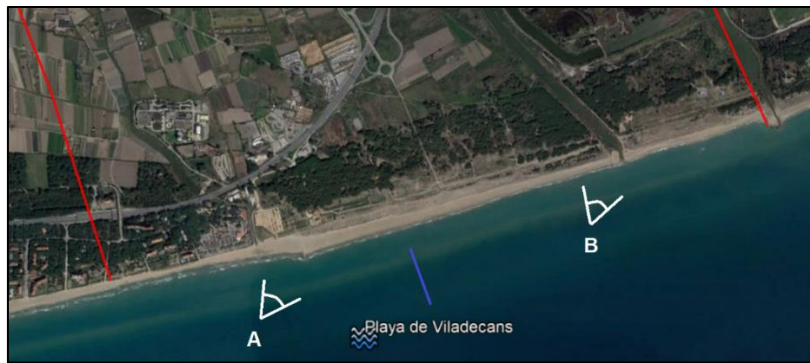


Figura 21. Playa de Viladecans.



Figura 22. Imagen A de la Figura 21. Playa de Viladecans en su tramo sur (2010).
Fuente: MAPAMA.



Figura 23. Imagen B de la Figura 21. Playa de Viladecans en su tramo norte (2010).
Fuente: MAPAMA.

Tal y como se puede observar en las Figura 21 a 23, la playa se encuentra entre 2 espigones, produciéndose una erosión progresiva en el tiempo y el espacio en su tramo Sur y Norte y una acumulación en el tramo central. Estos cambios se han visto agravados con la implantación de la nueva desembocadura del río Llobregat y la ampliación del Puerto de Barcelona.

Detrás de la playa de Viladecans se encuentra una Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) protegida por la unión Europea que debe ser preservada. Sin embargo, si el retroceso de la playa continua tal y como lo lleva haciendo los últimos años puede llegar a afectar esta zona. Además, los bancos de arena que se acumulan en los espigones taponan el desguace de las rieras al mar (Figura 24), provocando la inundación de los campos de cultivo y obliga, en el mejor de los casos, a bombear el agua para evitar que se pudran las cosechas. En caso de que se decidiera retirar el espigón, esto provocaría que la erosión que sufre la playa en sus extremos se extienda también a su tramo central, empeorando así el retroceso de la orilla en toda la zona.



Figura 24. Banco de arena que taponan la salida de una riera en la playa de Viladecans (2018).
Fuente: CCMA.

Por tanto, se acaba de identificar una zona potencial dentro de la misma celda litoral en la que se busca el lugar de extracción en la que, una vez retirado el espigón, podría depositarse la arena de un modo que no afecte a las desembocaduras de las rieras y así combatir la erosión progresiva y proteger la ZEPA.

- Playa de El Prat

La playa de El Prat está situada en el delta del Llobregat y tiene una longitud de 5,5 km. Se trata de un espacio en el que conviven grandes infraestructuras como el aeropuerto con espacios naturales como lagunas, marismas y pinares litorales. La puesta en funcionamiento de la depuradora del Baix Llobregat, que elimina las aportaciones de contaminantes al río, facilitó su recuperación. En esta playa se vuelven a encontrar equipamientos para el ocio de los bañistas. Su anchura media es de 28 m, aunque hay zonas en las que la playa ha desaparecido por completo debido a la intensa erosión provocada por la nueva desembocadura del río Llobregat y la ampliación del puerto de Barcelona. De hecho, esta es la playa que más ha sufrido sus consecuencias dada la proximidad a las infraestructuras, tal y como puede verse comparando las Figuras 25 y 26.



Figura 25. Playa de El Prat en el año 2001.

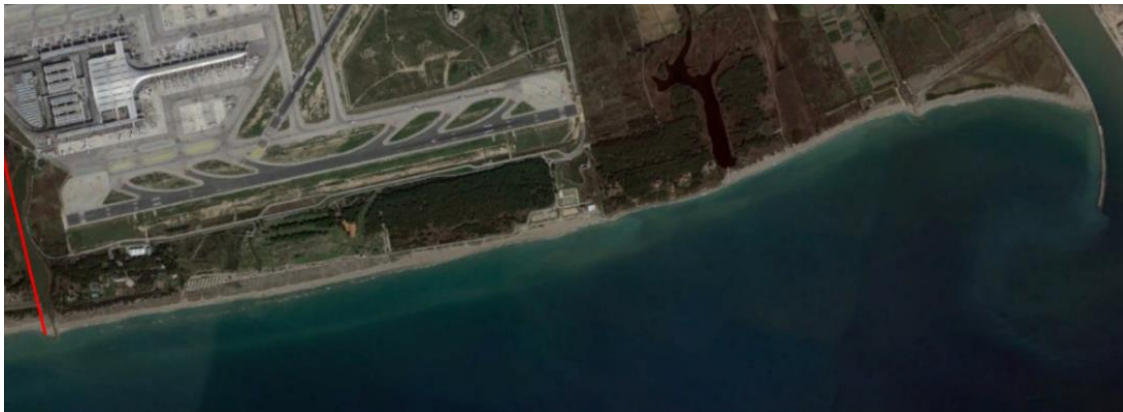


Figura 26. Playa de El Prat en el año 2017.

En relación con las Figuras anteriores, se observa que hay partes de la playa que han desaparecido por completo, como la que está situada antes de la laguna (en el 2001 tenía 20 m de anchura), y otras en las que se ha perdido una cantidad de arena considerable, como la zona frente a la nueva pista de aterrizaje del aeropuerto (se ha pasado de 130 metros a 80 m).

2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA

Como consecuencia del cambio de orientación de la costa visto anteriormente, la deriva litoral en el extremo Este y en el Oeste de la playa de Castelldefels se produce en sentidos opuestos (Gracia, 2010). La playa de Gavá está totalmente expuesta al oleaje procedente del Este, que es la dirección predominante por la que provienen las tormentas (tal y como se muestra más adelante). El ángulo de incidencia de este oleaje es oblicuo, produciendo de este modo un importante transporte longitudinal de sedimento hacia el Sur. Por otro lado, la playa de Castelldefels, al tener una orientación de 90°, el oleaje procedente del Este incide paralelamente a la línea de orilla y no provoca ningún tipo de transporte de sedimento. En este caso, la dirección predominante del oleaje pasa a ser la Suroeste.

Dichas condiciones dan como resultado un transporte neto de Gavá a Castelldefels y de la playa de les Botigues de Sitges hacia Gavá, y a medida que la orientación cambia, el valor del transporte de sedimento disminuye hasta que se supera el cambio de orientación. Es en este instante cuando su valor vuelve a aumentar, pero esta vez en sentido opuesto, tal y como queda reflejado en la Figura 27.



Figura 27. Transporte longitudinal de sedimento neto (LST), en $m^3/año$, a lo largo de la celda litoral.
Fuente: Gracia, 2010.

En consecuencia y como una primera aproximación, se espera que la zona de acumulación se localice entre Port Ginesta y el cambio de orientación de la costa situado entre las playas de Castelldefels y Gavá.

2.3. RÉGIMEN EXTREMAL DE OLEAJE

En una actuación como la de retirar una cantidad determinada de arena de una playa es muy importante garantizar la seguridad y operatividad de la zona en cuestión una vez realizada la extracción de sedimento. Por este motivo, para realizar el estudio se tienen en cuenta situaciones donde la altura del oleaje alcanza valores poco frecuentes.

Estas condiciones quedan reflejadas en el régimen extremal del oleaje, que es un modelo estadístico que describe la probabilidad con la que se puede representar un temporal de una cierta altura de ola asociada a un riesgo determinado (Puertos del Estado). Los datos que se presentan a continuación se extraen de la información registrada por la Boya de Barcelona II (Figura 28), disponible en el banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado.



Figura 28. Ubicación de la Boya de Barcelona II. Fuente: Puertos del Estado.

2.3.1. PERÍODO DE RETORNO

El periodo de retorno T_R es un concepto fundamental para cualquier diseño en ingeniería, ya que permite establecer un valor de un determinado parámetro (altura de ola en este caso) que debe soportar la obra para considerar que es suficientemente segura. Según las Recomendaciones de Obras Marítimas, documento de referencia para el diseño de estructuras marítimas, el período de retorno considerado debe ser de 25 años para actuaciones que se ejecuten en playas. Esto significa que el tiempo medio entre dos tormentas de altura de ola iguales o superiores a un valor determinado es igual a 25 años. En este estudio también se tienen en cuenta períodos de retorno iguales a 1 y 5 años, valores que permiten tener una idea más concreta de cómo se comporta la playa frente a temporales que son más frecuentes.

2.3.2. DIRECCIONES PREDOMINANTES DEL OLEAJE

Dada la morfología de la celda litoral vista anteriormente y la rosa de alturas de ola significativa según las direcciones dominantes (Figura 29), las direcciones de oleaje consideradas son las siguientes, y pueden verse en la Figura 30: Sureste (SE), Sur-Sureste (SSE), Sur (S) y Sur-Suroeste (SSW). Estas direcciones son las más importantes, ya que no inciden paralelamente a la línea de orilla y provocan un determinado transporte longitudinal de sedimento que, como consecuencia, acaba alterando las playas.

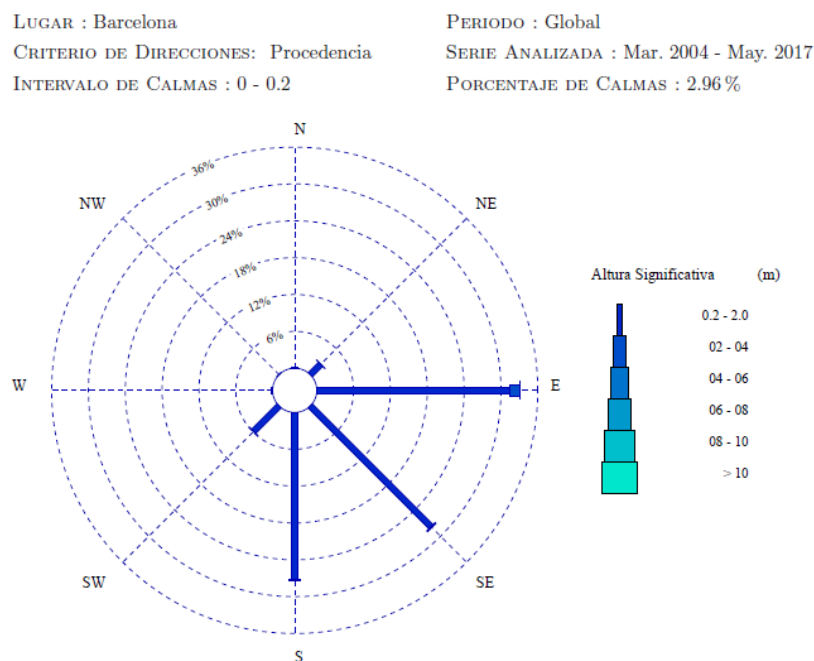


Figura 29. Rosa de altura de ola según las direcciones dominantes. Fuente: Puertos del Estado.

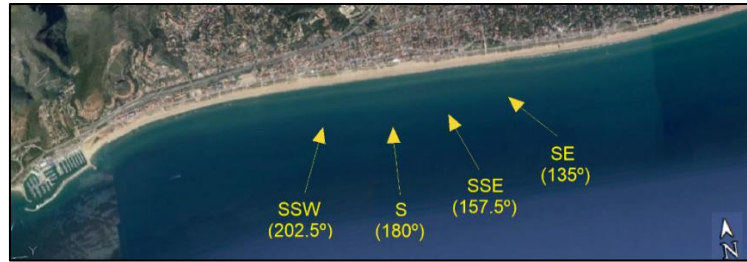


Figura 30. Direcciones predominantes del oleaje.

2.3.3. ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE Y PERÍODO PICO

Las olas se caracterizan principalmente por la altura de ola significativa H_s , que es la distancia que hay entre una cresta y un seno, y el período pico T_p , que es el tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas consecutivas por el mismo punto. En la Figura 31 pueden verse representados dichos parámetros.



Figura 31. Parámetros del oleaje. Fuente: Masmar.

Como punto de partida, el régimen de temporales se ha obtenido de manera escalar, es decir, que para el ajuste no se han tenido en cuenta las direcciones asociadas a los extremos medidos. Los valores se muestran en la Tabla 3 y en la Figura 32.

Tabla 3. Valores de altura de ola obtenidos a partir de la Figura 32.

Probabilidad de excedencia anual	T_R (años)	H_s escalar (m)
0,99999	1	2
0,20	5	4,3
0,04	25	5,4

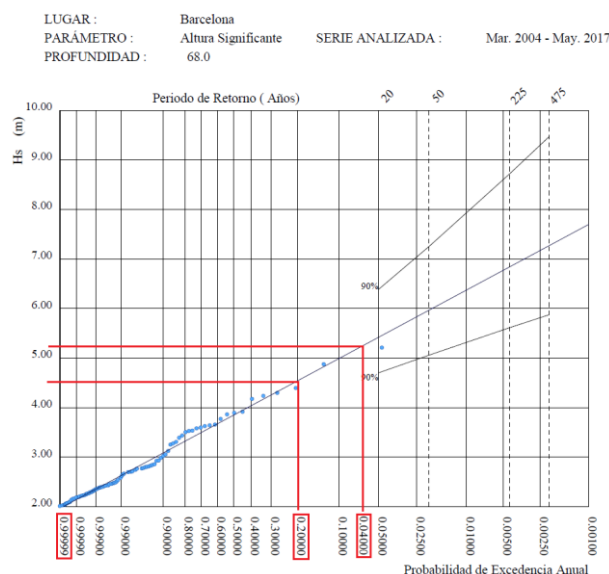


Figura 32. Régimen extremal escalar de oleaje. Fuente: Puertos del Estado.

El siguiente paso consiste en obtener la altura de ola significativa para cada una de las direcciones consideradas a partir de los coeficientes de direccionalidad K_d . Estos coeficientes se obtienen a través del régimen medio anual de altura de ola significativa por direcciones, tal y como se describe a continuación:

1. Se calcula el promedio de las alturas significativas que presentan una probabilidad de no excedencia anual igual a 0,99 y 0,999 para todas las direcciones de procedencia de la rosa de oleaje. La distribución elegida por Puertos del Estado para describir el régimen medio de las series de oleaje es *Weibull*, cuya expresión se define en la ecuación 2.1:

$$F_e(H_s) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{H_s - B}{A}\right)^C\right) \quad (2.1)$$

Donde $F_e(H_s)$ es la probabilidad de no excedencia anual y los coeficientes A , B y C son parámetros de ajuste. El régimen medio, generalmente, suele representarse de una forma gráfica mediante un histograma acumulado y el correspondiente ajuste teórico, todo ello en una escala especial en la cual la función *Weibull* aparece representada como una recta. En la Figura 33 se muestra la información facilitada por Puertos del Estado para la dirección de procedencia NE.

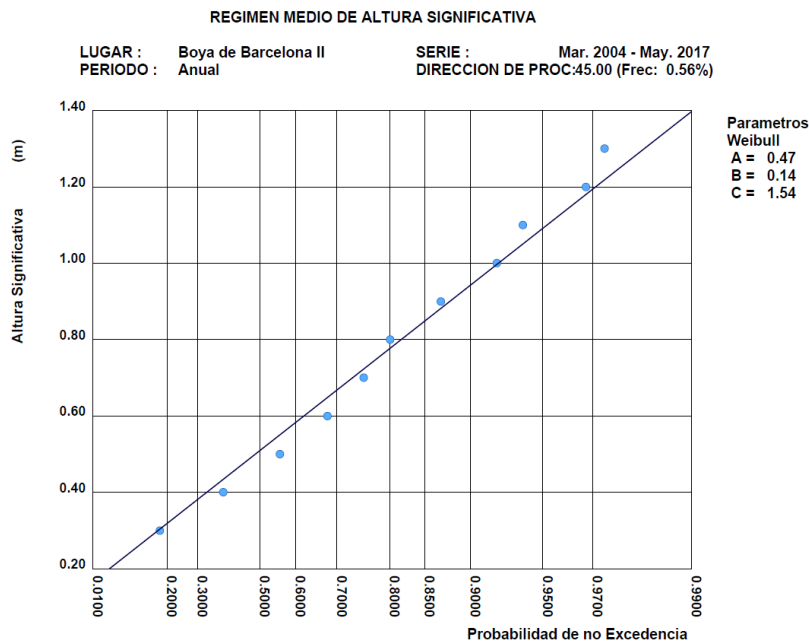


Figura 33. Régimen medio de H_s anual para la dirección NE. Fuente: Puertos del Estado.

2. Se divide el promedio obtenido de cada una de las direcciones entre el máximo de todas ellas. El resultado es el coeficiente K_d .
3. Se aplica el coeficiente K_d a la altura de ola significativa escalar de cada una de las direcciones consideradas en el estudio: SE, SSE, S, SSW.

Por otro lado, el período pico se obtiene a partir de la expresión 2.2, proporcionada por Puertos del Estado para el régimen extremal escalar, correspondiente a los datos de la boya Barcelona II:

$$T_p = 5.17 H_s^{0.40} \quad (2.2)$$

Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 4 y 5:

Tabla 4. Obtención de los coeficientes de direccionalidad.

Dirección de procedencia del oleaje	Probabilidad de No Excedencia		Promedio	K_{α}
	0,99	0,999		
NE	1,41	1,73	1,57	0,46
ENE	2,48	3,08	2,78	0,81
E	3,03	3,87	3,45	1,00
ESE	2,37	3,10	2,74	0,79
SE	1,66	2,03	1,85	0,53
SSE	1,54	1,97	1,76	0,51
S	1,62	2,07	1,85	0,53
SSW	2,04	2,57	2,31	0,67
SW	1,75	2,12	1,94	0,56

Tabla 5. Resultados de altura de ola y período pico por direcciones.

T_R (años)	H_s escalar (m)	H_s direccional (m)				T_p direccional (s)			
		SE	SSE	S	SSW	SE	SSE	S	SSW
1	2	1,07	1,02	1,07	1,34	5,31	5,21	5,31	5,81
5	4,3	2,30	2,19	2,30	2,87	7,21	7,07	7,21	7,89
25	5,4	2,89	2,75	2,89	3,61	7,90	7,75	7,90	8,64

2.4. NIVEL MEDIO DEL MAR

Como punto de partida se toma como referencia un tipo de tormenta que lleva asociada una sobreelevación del nivel del mar igual a 0 m.

En cuanto a otros posibles escenarios, se considera la sobreelevación causada por el efecto combinado de la marea astronómica y de la meteorológica que pueden tener lugar cuando hay temporales. Si bien ambas tienen un rango limitado en esta zona del Mediterráneo, su combinación puede dar lugar a variaciones del nivel del mar no despreciables. Las actuaciones que se proponen en este estudio son a corto o medio plazo, de modo que esta hipótesis realizada es una muy buena aproximación en escalas temporales de este orden.

Para estimar estos factores, se consideran los datos del mareógrafo de Barcelona (de Puertos del Estado) y se seleccionan dos valores. El primero es representativo de la mediana de los datos medidos (0,40 m), mientras que el segundo es similar a los valores máximos registrados en dicho mareógrafo (0,88 m). Teniendo en cuenta estos valores, los escenarios considerados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Variación del nivel medio del mar.

	Sobreelevación nivel del mar, SNM (m)
Escenario I	0
Escenario II	0,40
Escenario III	0,88

2.5. IMPACTO SOBRE LA PLAYA

Las variables de referencia a analizar para estudiar el comportamiento de una playa son la erosión/acumulación y la inundación (LIM UPC, 2014).

La erosión/acumulación consiste en la pérdida o ganancia de arena debido a la acción de olas y corrientes incidentes. Como consecuencia, la playa sufre un cambio en su morfología que puede contemplarse en diversos rangos de escalas espaciales y temporales. De esta forma se puede analizar si la costa se está erosionando, en qué grado, y debido a qué. En este estudio, para determinar en qué zonas de la celda litoral se produce erosión/acumulación se realiza un análisis a gran escala tanto espacial como temporal, con el objetivo de entender cuál ha sido la evolución del litoral a lo largo de los últimos años y el motivo de ésta. Por otro lado, una vez determinado el lugar de préstamo de la arena y ejecutada la extracción, el estudio del fenómeno de la erosión/acumulación se basa en episodios concretos provocados por eventos extremos. Se selecciona este enfoque porque estos episodios son los responsables de más del 90% del transporte de sedimento (Jiménez et al., 1997).

Por otro lado, la inundación se define como la ocupación transitoria de la zona emergida de la playa por una lámina de agua que puede acabar siendo perjudicial para los seres vivos, infraestructuras y ecosistemas, dado su calado y velocidad de propagación. Normalmente, los períodos de máxima inundación están asociados a los mismos eventos extremos que la erosión episódica (Sánchez-Arcilla et al., 2015).

3. ANÁLISIS HISTÓRICO DE LA EVOLUCIÓN DE LA COSTA

Tal y como se ha descrito anteriormente, el primero de los objetivos principales de este estudio consiste en la determinación de las zonas de erosión/acumulación en la celda litoral “Port Ginesta - Puerto de Barcelona” mediante un análisis histórico de la evolución de la línea de orilla. En el siguiente apartado se describe la metodología empleada y los resultados obtenidos.

3.1. METODOLOGÍA

3.1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

En el *Llibre Verd de l'Estat de la zona costanera a Catalunya* (CIIRC, 2010), disponible en la página web del Departamento de Territorio y Sostenibilidad de la Generalitat de Catalunya, se describen los datos utilizados para caracterizar la evolución de la línea de orilla a largo plazo y el método utilizado. El tipo de análisis realizado es uno de los elementos básicos utilizados para caracterizar el funcionamiento de las celdas costeras en cuanto a dinámica litoral. Aun así, el período de tiempo cubierto resulta escaso para utilizarlo en el presente estudio, ya que las líneas de costa utilizadas se encuentran entre los años 1957 y 2004 (1957, 1965, 1973, 1977, 1983, 1994, 1995, 2000 y 2004). Posteriormente a este último año, en el 2005, se realizó el desvío de la desembocadura del río Llobregat (Figuras 34 y 35) con el fin de ampliar el Puerto de Barcelona. Es de esperar que este conjunto de actuaciones provoquen cambios en la dinámica litoral de la zona, ya que supone una trampa para el sedimento y tiene unas consecuencias asociadas, tal y como se ha visto en el primer bloque de este estudio. Por tanto, en el presente análisis se emplea un método muy parecido al utilizado en el *Llibre verd de la costa catalana* con el fin de tener un análisis de la evolución de la costa que, partiendo de los mismos principios que el ya existente, sea más completo y recoja los cambios sufridos desde el 2004 hasta la actualidad.



Figura 34. Ortofoto del delta del río Llobregat en el año 2002.



Figura 35. Ortofoto del delta del río Llobregat en el año 2006.

3.1.2. DATOS DISPONIBLES

El conjunto de datos utilizados para analizar la evolución de la costa a lo largo de la celda litoral “Port Ginesta – Puerto de Barcelona” consiste en una colección de líneas de orilla, obtenidas a partir de las fotografías aéreas hechas en diferentes vuelos realizados por el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) en los años 2004, 2006, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 y 2017, y publicadas en formato digital como ortofotomapas. Estos ortofotomapas están disponibles como *World Map Service (WMS)* y en proyección UTM a una escala 1:5.000. Las líneas de orilla se han digitalizado mediante un sistema de información geográfica (ArcGIS10.5)

considerando la línea de orilla como el último punto de la playa emergida mojado por las olas en el momento de la foto.

3.1.3. PRECISIÓN DE LOS DATOS

Uno de los puntos principales a tener en cuenta cuando se interpretan los resultados que se obtienen del análisis de la evolución costera a partir de una comparación de posiciones de líneas de orilla es el error asociado a los datos. Este error es el que acabará determinando la validez de los resultados, ya que en algunos casos puede llegar a ser de magnitud similar o superior a las variaciones experimentadas por la costa (Sánchez-Arcilla et al., 2008).

En general, las diferentes fuentes de error pueden agruparse en dos grandes grupos: aquellas asociadas a la restitución de la propia foto y que vienen determinadas por la escala del vuelo (Thieler y Danforth, 1994) y las relacionadas con la propia definición de línea de orilla.

La estimación del error asociado a la primera de las fuentes depende del proceso de restitución llevado a cabo sobre la foto. Las propias especificaciones técnicas de la base topográfica 1:5.000 del ICC indican que el 90% de los puntos bien definidos recogidos por fotogrametría tienen una precisión de 1 metro en X y en Y, y 1,5 m en Z.

En segundo lugar, se debe considerar el error asociado durante la definición de la línea de orilla, el cual se puede delimitar a partir de las características físicas de la zona de estudio. En general, las posibles variaciones en la posición de la línea de orilla a causa de la cota escogida para su definición, como por ejemplo las debidas a la variación en la posición del nivel del mar durante la foto, son fáciles de calcular siempre que se sepa la posición vertical del nivel de referencia escogido y el perfil topográfico de la zona. En este caso, el error E provocado por una variación en la cota seleccionada para la definición de la línea de orilla ΔZ , sobre un perfil de playa de pendiente $\tan \alpha$ queda definido en la expresión 3.1.

$$E = \frac{\Delta Z}{\tan \alpha} \quad (3.1)$$

En este caso se desconoce la cota correspondiente a la línea definida por la arena mojada por las olas de la playa emergida en cada una de las ortofotos disponibles. Para calcular el error, se consulta las pendientes medias de las playas en el *Llibre verd de la costa catalana*. En la Tabla 7 se muestran las pendientes de cada playa analizada en este estudio.

Tabla 7. Pendientes medias de las playas. Fuente: *Llibre verd de la costa catalana* (CIIRC, 2010).

Playa	Pendiente ($\tan \alpha$)
Les Botigues	0,06
Castelldefels	0,08
Gavá	0,25
Viladecans	0,05
El Prat	0,07

Por otro lado, se asume una variación en vertical del nivel del mar de 0,50 m, que se corresponde con el percentil 95 de las sobreelevaciones combinadas de las mareas astronómica y meteorológica típicas del litoral catalán (Jiménez et al., 2008). De este modo, el error en la determinación horizontal de la línea de orilla para cada playa es el que se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Errores en la determinación horizontal de la línea de orilla.

Playa	E (m)
Les Botigues	8,32
Castelldefels	6,24
Gavá	2,00
Viladecans	10,00
El Prat	7,04

Finalmente, se consideran de manera acumulada todas las fuentes de error en la Tabla 9, valores que son del mismo orden de magnitud que otros estudios de características similares (Anders y Byrness, 1991).

Tabla 9. Errores estimados en la posición de la línea de orilla para cada playa.

Playa	Error estimado (m)
Les Botigues	9,32 (1,00+8,32)
Castelldefels	6,24 (1,00+6,24)
Gavá	3,00 (1,00+2,00)
Viladecans	11,00 (1,00+10,00)
El Prat	8.04(1,00+7,04)

3.1.4. MÉTODO DE ANÁLISIS

Para analizar la evolución histórica de la costa desde el año 2004 hasta el 2017 se utiliza como herramienta de cálculo la extensión Digital Shoreline Analysis System (DSAS), desarrollada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (Tjieler et al., 2005), disponible a través del sistema de información geográfico ArcGIS10.5.

Una vez dibujadas en ArcGIS10.5 todas las líneas de orilla disponibles, se define una línea de referencia (*baseline*), la cual en este caso se ha hecho coincidir con un punto fijo: el límite del paseo marítimo o, en su ausencia, con el inicio de la playa. De este modo la distancia entre la línea de referencia y la línea de orilla coincide con propio ancho de la playa. En la Figura 36 se muestra un ejemplo de la información recopilada hasta ahora.



Figura 36. Ejemplo de la información recopilada antes de utilizar DSAS. Fuente: USGS.

El siguiente paso consiste en definir el espaciamiento de los transectos (Figura 37). Estos son líneas que genera el propio programa y que, partiendo de la *baseline*, son perpendiculares a todas las líneas de orilla que encuentra a su paso. La intersección de cada uno de ellos con las distintas líneas de orilla son los puntos de cálculo de la tendencia evolutiva. El espaciamiento definido en este caso es de 50 metros, distancia suficiente para analizar al detalle la evolución a lo largo de toda la celda litoral sin perder información entre ellos. Su longitud es igual a 600 m,

para que los resultados gráficos puedan representarse a grandes escalas. En la tabla de atributos de ArcGIS10.5 de cada uno de ellos es donde quedan registrados los cálculos realizados por DSAS.

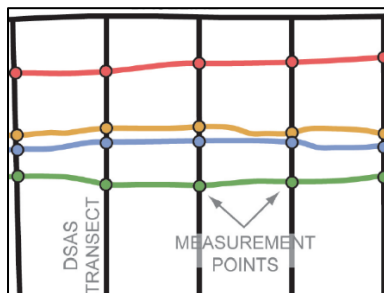


Figura 37. Transectos y puntos de medida de la tasa de evolución en DSAS. Fuente: USGS.

El programa proporciona diferentes métodos para estimar las tasas evolutivas de la línea de orilla. Entre los diferentes tipos de estimaciones, destacan dos: la EPR (*end point rate*) y la LRR (*linear regresion rate*). La primera de ellas utiliza únicamente dos posiciones de la línea de orilla, la primera y la última disponible, despreciando todas las posiciones intermedias. Así, la tasa evolutiva corresponde con el desplazamiento sufrido entre ambas situaciones normalizando el tiempo recorrido entre ellas. El método es útil cuando no es importante estudiar la tendencia evolutiva de la costa a lo largo del tiempo, es decir, cuando se pretende evaluar en términos estrictos el avance o retroceso de la misma. Por otro lado, el método LRR tiene en cuenta todas las posiciones disponibles de la línea de orilla a lo largo de los años considerados y la tasa evolutiva se obtiene mediante una regresión lineal por mínimos cuadrados utilizando el desplazamiento de la línea de orilla como variable dependiente. En este caso, al considerar todas las líneas existentes, se tienen en cuenta variaciones a lo largo del tiempo. Las únicas desventajas de este método son las asociadas a la técnica estadística por si misma.

En este estudio, el método utilizado es el LRR, ya que se dispone de la posición de la línea de orilla de todos los años comprendidos entre el 2004 y el 2017 en todas las playas consideradas.

Es importante destacar que cuando se quieran analizar los resultados obtenidos con DSAS, hay que asumir la existencia de una franja de confianza asociada con un posible nivel de variación de los resultados. Esto es debido a que las líneas de orilla llevan asociadas el error estimado anteriormente, al cual hay que añadir el error del propio modelo estadístico que DSAS utiliza. Por tanto, las tasas evolutivas no siempre se pueden entender en un sentido estricto, sino que dan una idea del orden de magnitud de las variaciones analizadas.

3.1.5. ESQUEMA DEL ESTUDIO

El esquema de la resolución del análisis histórico de la evolución de la costa se define del siguiente modo:

1. Digitalización las líneas de orilla de los años comprendidos entre el 2004 y el 2017 en ArcGIS10.5.
2. Definición de la línea de referencia conocida como *baseline*.
3. Definición del espaciamiento y la longitud de los transectos.
4. Calculo de la regresión lineal mediante DSAS.
5. Representación gráfica de los resultados recogidos en cada transecto con ArcGIS10.5.

3.2. RESULTADOS

Se han obtenido los resultados de la evolución de la línea de orilla en las playas de Les Botigues de Sitges, Castelldefels, Gavá, Viladecans y El Prat de Llobregat entre los años 2004 y 2017. En primer lugar, se muestra el resultado obtenido a escala de celda litoral en la que aparecen todas las playas analizadas (Figura 38 y Tabla 10). A continuación, se muestran las figuras representativas de cada playa por separado, acompañadas de una tabla explicativa que recoge los valores más relevantes obtenidos con DSAS y los compara con aquellos extraídos del *Llibre verd de la costa catalana* en el período 1957 – 2004: longitud de la zona de erosión, tasa de erosión máxima, tasa de erosión mínima, tasa de erosión media, longitud de la zona de acreción, tasa de acreción máxima, tasa de acreción mínima, tasa de acreción media y, como conclusión, el estado evolutivo.

En cada una de las figuras se puede ver una ortofoto de las playas en su estado actual. En ella se sobreponen los transectos generados con DSAS, cada uno de los cuales queda representado con un color asociado al valor de la regresión lineal que el programa ha calculado.

3.2.1. RESULTADOS A ESCALA DE CELDA LITORAL

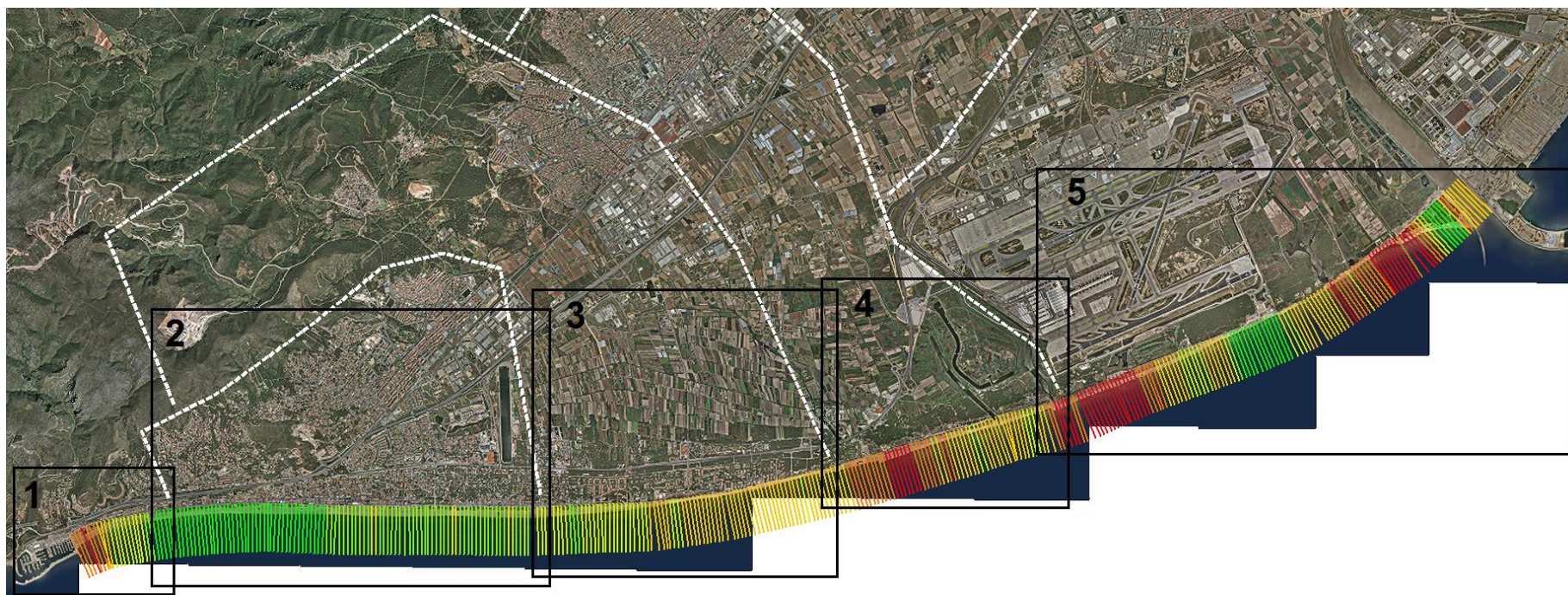


Figura 38. Evolución de la línea de orilla en la celda litoral “Port Ginesta – Puerto de Barcelona” entre el 2004 y el 2017.

Tabla 10. Leyenda de la Figura 38.

Acreción	m/a	Acreción muy fuerte	[2, 4.85]
		Acreción fuerte	[1.00, 2.00)
		Acreción moderada	[0, 1.00)
Erosión	m/a	Erosión muy fuerte	(-2.00, -3.34]
		Erosión fuerte	(-1.00, -2.00]
		Erosión moderada	(0, -1.00]

3.2.2. RESULTADOS EN LA PLAYA DE LES BOTIGUES DE SITGES

Tabla 11. Evolución de la línea de la orilla en los períodos 1957 – 2004 y 2004 – 2017 en la playa de Les Botigues de Sitges. Fuente: Llibre verd de la costa catalana y elaboración propia con DSAS.

Período	años	1957 – 2004	2004 – 2017
Longitud zona erosión	m	414	630
Erosión máxima	m	-	-2,05
Erosión mínima	m	-	-0,43
Tasa de erosión media	m/año	-0,5	-1,30
Longitud zona acreción	m	1.016	800
Acreción máxima	m	-	+2,59
Acreción mínima	m	-	+0,37
Tasa de acreción media	m/año	+0,9	+1,29
Estado evolutivo		ACRECIÓN	EQUILIBRIO

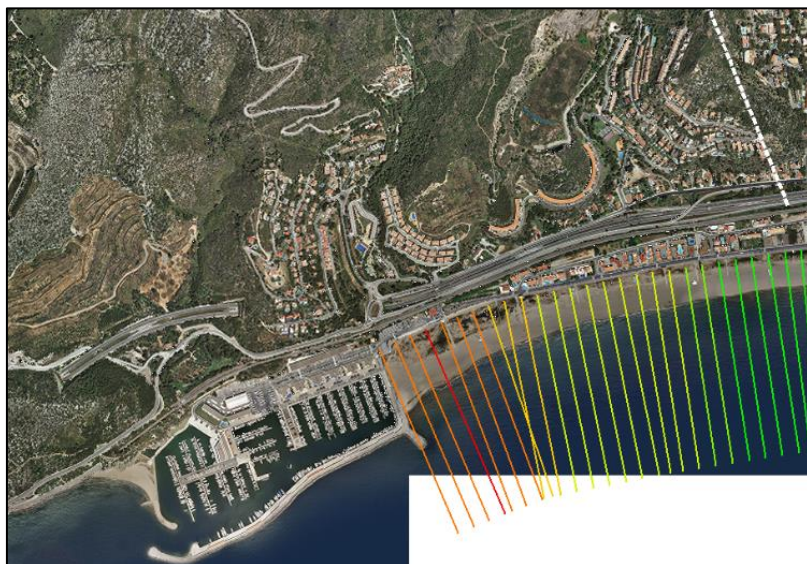


Figura 39. Imagen 1 de la Figura 38. Transectos de la evolución de la línea de orilla entre los años 2004 y 2017 en la playa de Les Botigues.

3.2.3. RESULTADOS EN LA PLAYA DE CASTELLDEFELS

Tabla 12. Evolución de la línea de la orilla en los períodos 1957 – 2004 y 2004 – 2017 en la playa de Castelldefels. Fuente: Llibre verd de la costa catalana y elaboración propia con DSAS.

Período	años	1957 – 2004	2004 – 2017
Longitud zona erosión	m	1.738	0
Erosión máxima	m	-	0
Erosión mínima	m	-	0
Tasa de erosión media	m/a	-0,9	0
Longitud zona acreción	m	2.546	4.284
Acreción máxima	m	-	+4,85
Acreción mínima	m	-	+0,93
Tasa de acreción media	m/a	+0,7	+2,03
Estado evolutivo		EQUILIBRIO	ACRECIÓN

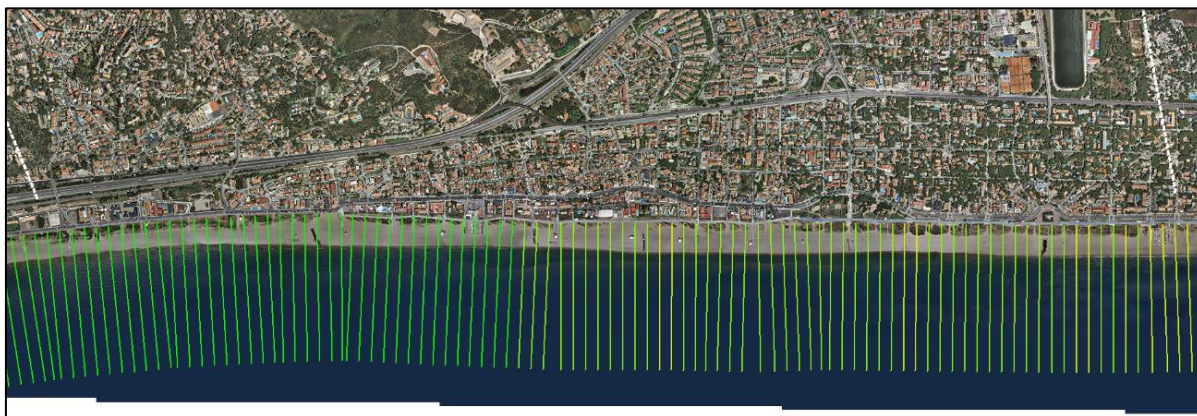


Figura 40. Imagen 2 de la Figura 38. Transectos de evolución de la línea de orilla entre los años 2004 y 2017 en la playa de Castelldefels.

3.2.4. RESULTADOS EN LA PLAYA DE GAVÁ

Tabla 13. Evolución de la línea de la orilla en los períodos 1957 – 2004 y 2004 – 2017 en la playa de Gavá. Fuente: Llibre verd de la costa catalana y elaboración propia con DSAS.

Período	años	1957 – 2004	2004 – 2017
Longitud zona erosión	m	2.494	2.283
Erosión máxima	m	-	-0,75
Erosión mínima	m	-	-0,03
Tasa de erosión media	m/a	-0,8	-0,40
Longitud zona acreción	m	867	1.078
Acreción máxima	m	-	+1,1
Acreción mínima	m	-	+0,17
Tasa de acreción media	m/a	+0,5	+0,70
Estado evolutivo		EROSIÓN	EROSIÓN

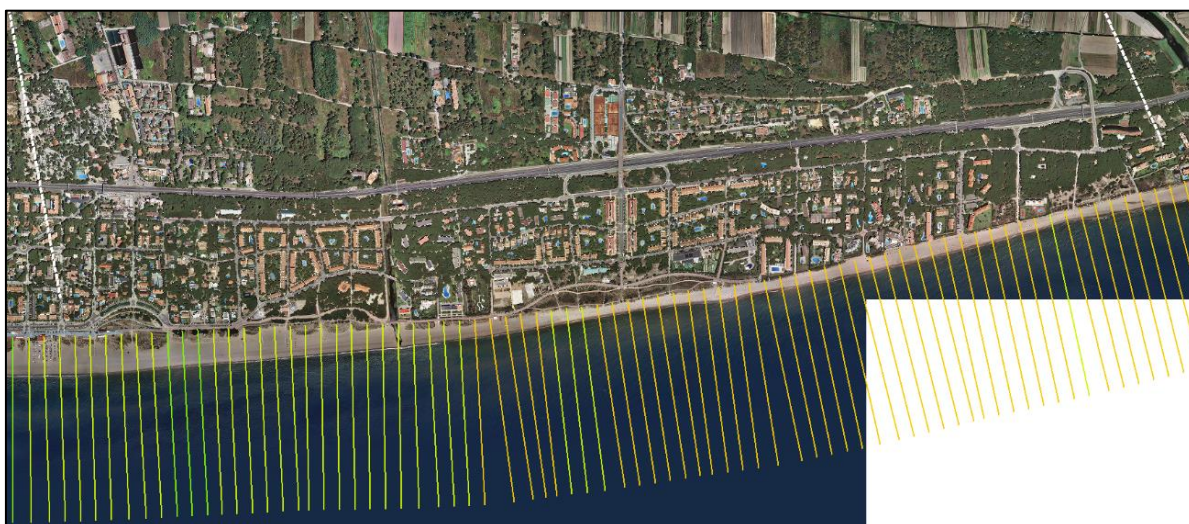


Figura 41. Imagen 3 de la Figura 38. Transectos de evolución de línea de orilla entre los años 2004 y 2017 en la playa de Gavá.

3.2.5. RESULTADOS EN LA PLAYA DE VILADECANS.

Tabla 14. Evolución de la línea de la orilla en los períodos 1957 – 2004 y 2004 – 2017 en la playa de Viladecans. Fuente: Llibre verd de la costa catalana y elaboración propia con DSAS.

Período	años	1957 – 2004	2004 – 2017
Longitud zona erosión	m	745	1.998
Tasa erosión máxima	m/a	-	-2,61
Tasa erosión mínima	m/a	-	-0,42
Tasa de erosión media	m/a	-1,1	-1,04
Longitud zona acreción	m	1.453	200
Tasa acreción máxima	m/a	-	+0,38
Tasa acreción mínima	m/a	-	+0,08
Tasa de acreción media	m/a	+1,4	+0,27
Estado evolutivo		ACRECIÓN	EROSIÓN



Figura 42. Imagen 4 de la Figura 38. Transectos de evolución de la línea de orilla entre los años 2004 y 2017 en la playa de Viladecans.

3.2.6. RESULTADOS EN LA PLAYA DE EL PRAT

Tabla 15. Evolución de la línea de la orilla en los períodos 1957 – 2004 y 2004 – 2017 en la playa de El Prat. Fuente: Llibre verd de la costa catalana y elaboración propia con DSAS.

Período	años	1957 – 2004	2004 – 2017
Longitud zona erosión	m	3.131	3908
Erosión máxima	m/a	-	-3,34
Erosión mínima	m/a	-	-0,10
Tasa de erosión media	m/a	-2,2	-1,96
Longitud zona acreción	m	1.615	1,160
Acreción máxima	m/a	-	+4,85
Acreción mínima	m/a	-	+0,11
Tasa de acreción media	m/a	+1,8	+2,34
Estado evolutivo		EROSIÓN	EROSIÓN

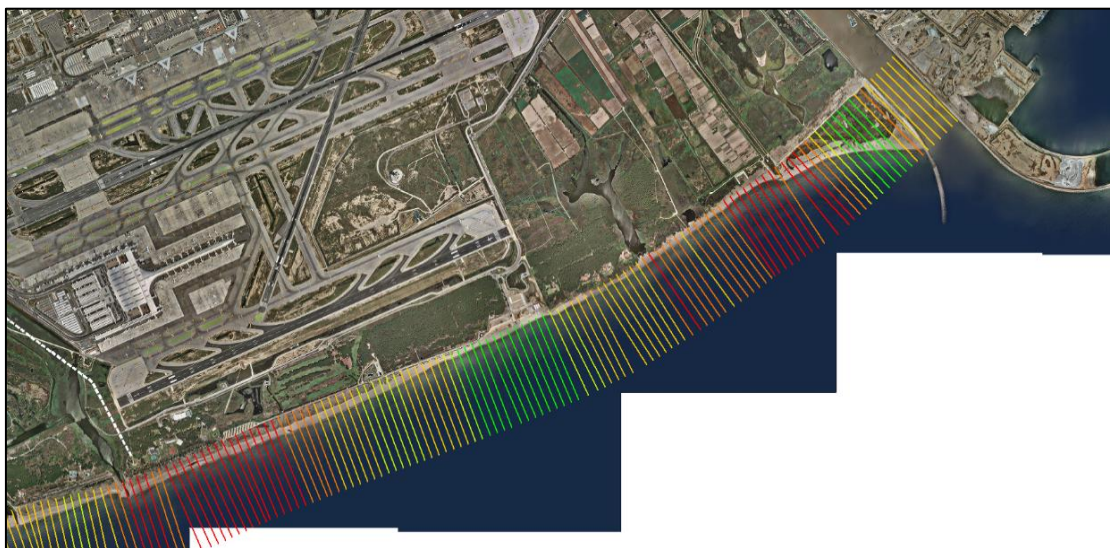


Figura 43. Imagen 5 de la Figura 38. Transectos de evolución de línea de orilla entre los años 2004 y 2017 en la playa de El Prat.

3.3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la Figura 38 se puede ver cuál ha sido la evolución de la línea de la costa en la celda litoral entre el 2004 y el 2017. Se observa una dinámica bien clara: erosión en las playas de El Prat, Viladecans y Gavá, más pronunciada en unas zonas que en otras, y acumulación en la playa de Castelldefels y en una pequeña parte de la playa de Les Botigues de Sitges.

La nueva desembocadura del río Llobregat resulta ser un obstáculo para el paso de sedimento y provoca el mismo efecto que el de un espigón aguas abajo del mismo: una pequeña zona de acumulación justo después de él y una erosión prolongada en el tiempo y en el espacio a medida que se avanza hacia el Sur. Esta erosión, además, se prolonga todavía más en el espacio como consecuencia del cambio de orientación de la costa en la zona de Gavá. Finalmente, el sedimento erosionado y el procedente del río Llobregat se acumulan en Castelldefels.

- Playa de les Botigues de Sitges

La evolución de la línea de orilla en la playa de Les Botigues de Sitges (Figura 39 y Tabla 11) refleja con una gran exactitud la dinámica del transporte de sedimento visto en la Figura 27. El Port Ginesta bloquea el sedimento transportado, y después la hidrodinámica marina se encarga de desplazarlo hacia el Este.

Las tasas correspondientes a los años 1957 – 2004 muestran también esta tendencia (Tabla 11). La longitud de la zona de erosión correspondiente a la zona de la playa adyacente al puerto es igual a 414 m y la tasa de erosión es de 0,5 m/año. Por otro lado, la longitud de la zona de acreción es de 1.016 m y la tasa de acreción asociada es de 0,9 m/año. En consecuencia, la playa se encontraba a lo largo de estos años en acreción. En el período 2004 – 2017 se observa una tendencia muy similar, pero con ligeros cambios. La longitud de la zona de erosión incrementa hasta los 630 m y la longitud de la zona de erosión disminuye hasta un tramo de longitud igual a 800 m. Las tasas de erosión y acumulación en este caso son de 1,30 m/año y 1,29 m/año respectivamente. Por tanto, la playa pasa a estar en equilibrio.

En cuanto a las tasas medias de evolución, se observa como se ha producido un incremento, tanto en la acreción como en la erosión. Esto es debido a que la dinámica litoral se ha visto desequilibrada a lo largo de los años, como consecuencia de la construcción de infraestructuras marítimas.

- Playa de Castelldefels

A diferencia de la playa anterior, la playa de Castelldefels muestra un gran cambio en la evolución de la línea de orilla entre los dos períodos considerados (Figura 40 y Tabla 12). Entre los años 1957 y 2004 la playa tenía dos zonas claramente diferenciadas: una en la que se producía erosión, con una tasa media igual a 0,9 m/año, y otra en acreción, con una tasa media igual a 0,7 m/año, provocando que la playa estuviese en equilibrio. En cambio, entre los años 2004 y 2017 se observa una dinámica completamente diferente: la zona de erosión deja de existir, y a lo largo de toda la playa se acumula sedimento a un ritmo medio igual a 2,03 m/año.

Dado que el abanico de resultados entre el valor máximo y el valor mínimo es muy grande, se pueden diferenciar dos zonas que presentan diferentes tasas de acreción (Figura 44). A lo largo de todo el Tramo 1 (entre las calles Uruguay y Calle 13), de una longitud de 3.500 m, se observa una tasa de crecimiento superior a 1,5 m/año, hasta llegar a un máximo de 4,85 m/año, mientras que en el Tramo 2, a lo largo de 1.155 m, la tasa de acreción media es inferior a 1,5 m/año, con un mínimo igual a 0,93 m/año.



Figura 44. Diferentes tramos diferenciados en la playa de Castelldefels según la tasa de acreción que presentan. Tramo 1 con una tasa de acreción superior a 1.5 metros/año y Tramo 2 con una tasa inferior a 1.5 metros/año.

Con el objetivo de entender cómo se ha producido la acumulación de sedimento a lo largo del tramo con mayor acumulación, se presenta la Figura 46, donde se muestra la evolución de la línea de orilla en la posición indicada en la Figura 45.



Figura 45. Posición de la sección representada en la Figura 46 en la playa de Castelldefels.

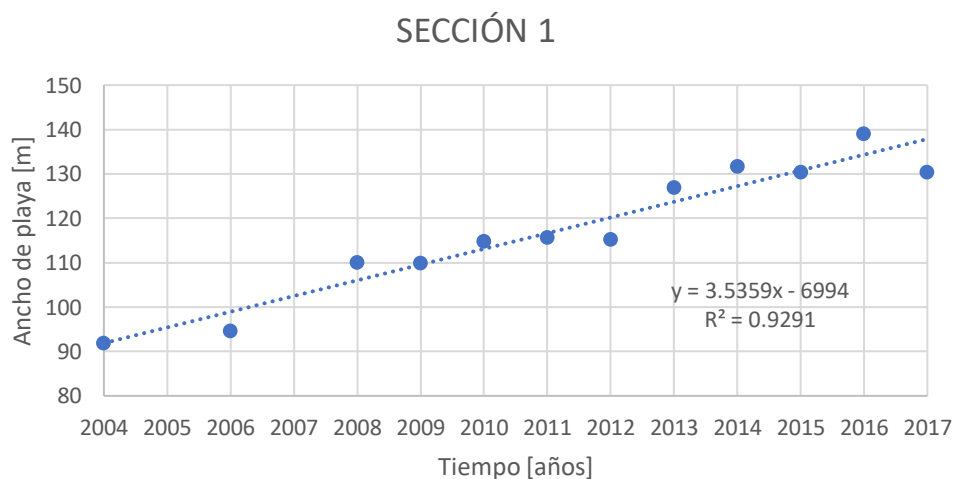


Figura 46. Evolución del ancho de playa entre los años 2004 y 2017 en la playa de Castelldefels.

En la Figura 46 se observa como la línea de orilla presenta una tendencia creciente y lineal a lo largo de los últimos años. Además, parece ser que esta evolución se produce de manera escalonada. Durante tres años la playa tiene un ancho de playa que sufre pequeñas variaciones, mientras que al año siguiente se produce un incremento considerable respecto los 3 años anteriores. Finalmente, también se puede ver como la playa nunca ha presentado un ancho de

playa inferior al de un año anterior, confirmando así que la evolución es constante en el tiempo, exceptuando en el año 2017. En este año la ortofoto disponible en el ICC se realizó pocos días después de un fuerte temporal que arrastró una cantidad importante de sedimento a la parte sumergida de la playa.

- Playa de Gavá

Los resultados obtenidos en la playa de Gavá son muy parecidos a los del período 1957 – 2004 (Figura 41 y Tabla 13). Esto es debido a que esta playa es la que está más alejada de las infraestructuras marítimas construidas en la celda litoral. De modo que el factor más relevante que controla la dinámica litoral en esta zona es el cambio de orientación de la costa. La longitud de la zona de erosión se mantiene entorno a los 2.300 m, al igual que la longitud de la zona de acreción, pero ésta alrededor de los 900 m. Por otro lado, la tasa de erosión media ha disminuido a la mitad en el período 2004 – 2017 (desde 0,80 m/año hasta 0,40 m/año), mientras que la acreción ha aumentado ligeramente, pasando de los 0,5 m/año a los 0,7 m/año.

- Playa de Viladecans

La playa de Viladecans, juntamente con la playa de Castelldefels, es una de las playas de la celda litoral en la que más ha cambiado el comportamiento evolutivo (Figura 42). En la Tabla 14 se puede ver que ha pasado de ser una playa que se encontraba en acreción a erosionarse en la actualidad. La longitud de la zona de erosión entre los años 1957 – 2004 era únicamente de 745 m, mientras que en el período comprendido entre los años 2004 y 2017 se incrementa más del doble, hasta 1.998 m. El mismo cambio, pero en sentido inverso, sucede en la zona de acreción, que pasa de 1.453 m a solamente 200 m. Por otro lado, la tasa de erosión media se mantiene en 1 m/año, mientras que la tasa de acreción media disminuye desde 1,4 m/año hasta 0,27 m/año.

En esta playa es donde se produce una mayor erosión en toda la costa. Con el fin de analizar dicha erosión, se elaboran las Figuras 48 y 49, que muestran la evolución del ancho de playa en los transectos indicados en la Figura 47.

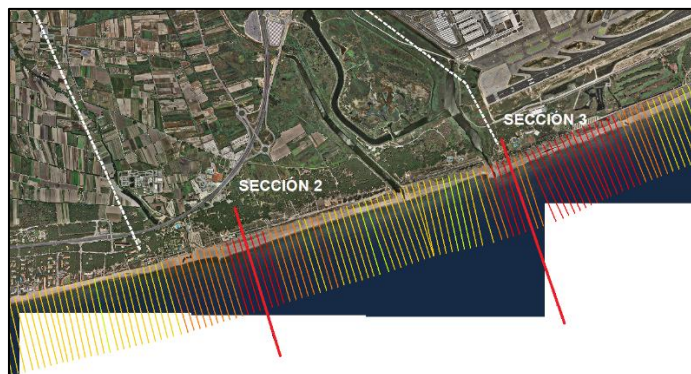


Figura 47. Posición de las secciones representadas en las Figuras 48 y 49.

SECCIÓN 2

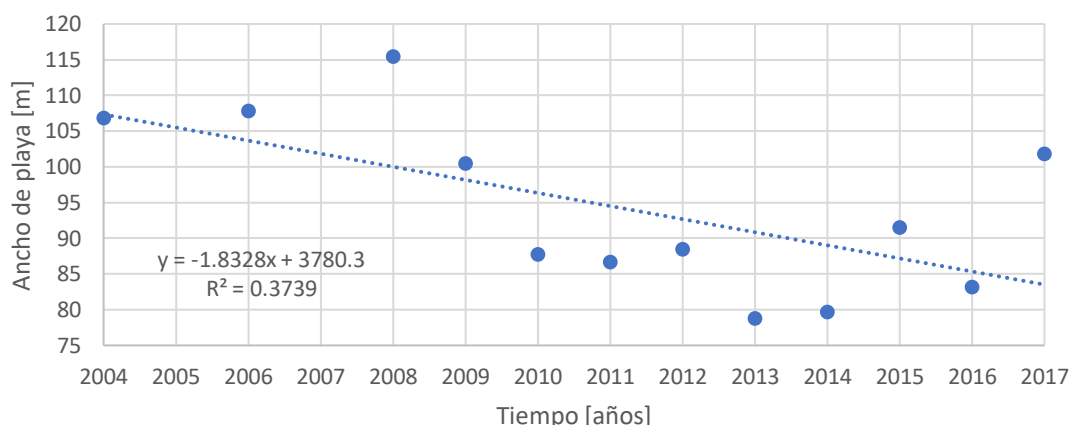


Figura 48. Evolución del ancho de playa entre los años 2004 y 2017 en la Playa de Viladecans.

SECCIÓN 3

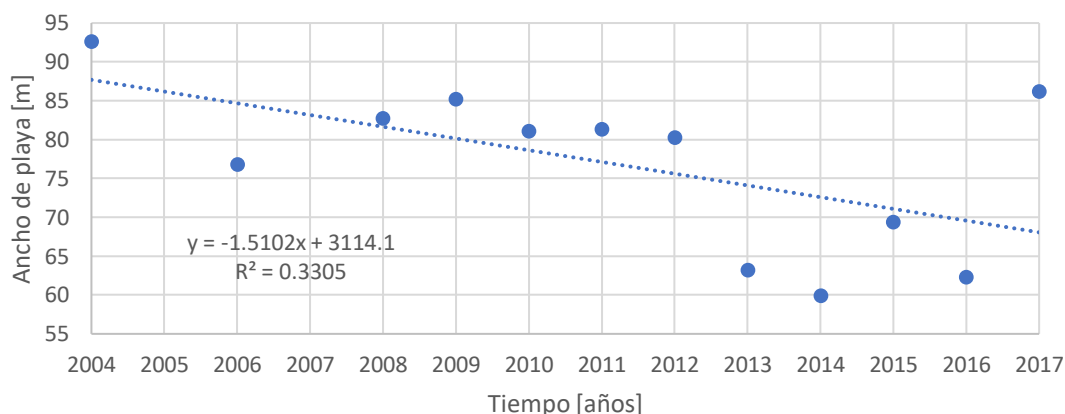


Figura 49. Evolución del ancho de playa entre los años 2004 y 2017 en la playa de Viladecans.

Las Figuras 48 y 49 muestran una tendencia de erosión prácticamente similar en las dos zonas opuestas de la playa de Viladecans. Se observa una erosión progresiva en el tiempo, pero en este caso la evolución no es tan lineal como en la playa de Castelldefels. En unos años determinados la erosión se ve interrumpida por un repentino incremento de la anchura de playa. Esto es debido a que en esos años en concreto se han realizado reposiciones de arena puntuales. De modo que el retroceso de la playa podría haber sido incluso peor que el que se ha obtenido.

Comparando la evolución de la costa de los dos períodos considerados, todo hace indicar que la ampliación del Puerto de Barcelona y la nueva ubicación de la desembocadura del río Llobregat han provocado que esta playa cambie su estado evolutivo de acreción a erosión y que además esté desapareciendo a gran velocidad.

- Playa de El Prat

Finalmente, la última de las playas analizadas no muestra un gran cambio en su tendencia evolutiva (Figura 43 y Tabla 15). Esta playa ya se encontraba en erosión en los años previos al 2004 y esta tendencia se ha mantenido hasta el 2017. El único cambio significativo se ve en la tasa de acreción media, que ha incrementado hasta llegar a 2,34 m/año a lo largo de un tramo

de 1.160 m. Esto es consecuencia de la acumulación que provocan las trampas de sedimento en las zonas más próximas a su cara trasera. Por otro lado, la erosión se mantiene alrededor de los 2,00 m/año desde el 1957 a lo largo de 3.908 m de playa.

3.4. CONCLUSIONES

Los procesos morfodinámicos a lo largo de la celda litoral “Port Ginesta – Puerto de Barcelona” analizados en este estudio para un intervalo de 14 años (desde el 2004 hasta el 2017), revelan un predominio del retroceso de la línea de costa en las playas de Gavá, Viladecans y El Prat <n un equilibrio en la playa de Les Botigues de Sitges y una tendencia de acumulación de sedimento en la playa de Castelldefels.

Las diferencias entre los resultados obtenidos para el período 2004 – 2017 y los mostrados en el *Llibre verd de la costa de catalana* en los años comprendidos entre 1957 – 2004, ponen en evidencia el cambio en el carácter morfodinámico de la celda litoral provocado por la implantación de infraestructuras marítimas que obstruyen el transporte longitudinal de sedimento. En consecuencia, la erosión se ha visto incrementada en aquellas playas en las que ya se producía (Gavá y El Prat) y, además, ha aparecido en zonas que anteriormente mostraban un comportamiento evolutivo completamente opuesto (Viladecans).

Las tasas anuales correspondientes a los diferentes intervalos temporales utilizados en el análisis comparativo indican que los cambios más significativos en cuanto a las tasas de acreción se producen en Castelldefels, y se encuentran entre 0,7 m/año y 4,85 m/año. En cambio, los máximos retrocesos se concentran en la playa de Viladecans y el Prat, y oscilan entre 0,42 m/año y 2,61 m/año, y 0,10 m/año y 3,34 m/año respectivamente. La playa de Gavá mantiene su evolución regresiva con una tasa que sufre variaciones muy pequeñas respecto los años anteriores.

Finalmente, una vez analizado el comportamiento evolutivo de la celda litoral a lo largo de los últimos años, se define el Tramo 1 de la playa de Castelldefels con una longitud igual a 3.500 m, como la zona de acumulación más adecuada para realizar la extracción de arena (se puede consultar un reportaje fotográfico de dicha zona en el Anexo 1). Con tal de minimizar los posibles efectos de las alternativas de extracción que se proponen en el siguiente capítulo, se ha impuesto que la tasa evolutiva de la línea de orilla sea superior a 1.5 m/año. La dinámica del transporte longitudinal desplaza el sedimento de la playa de Les Botigues, Gavá, Viladecans y El Prat a la playa de Castelldefels, que ha visto como con el paso de los años ha ido ganando terreno al mar.

Una vez estudiadas las evoluciones de la línea de orilla, el siguiente paso de este estudio consiste en analizar si en el Tramo 1 de la playa de Castelldefels (Figura 50) es posible realizar una extracción de arena y con qué características (volumen extraído, geometría, etc.), para que la playa pueda seguir realizando su función de protección.



Figura 50. Ubicación del lugar de extracción de arena en la playa de Castelldefels.

4. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA MORFOLÓGICA DE LA PLAYA FRENTE A TEMPORALES

Una vez se conoce que el lugar de extracción de sedimento es el Tramo 1 de la playa de Castelldefels, el siguiente paso consiste en analizar la respuesta morfológica de la playa frente a los temporales considerados en las condiciones previas y posteriores a la extracción de arena. En los siguientes capítulos también se describen los 3 procesos de extracción propuestos, la metodología a seguir y se presentan los resultados.

4.1. METODOLOGÍA

4.1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Para analizar el comportamiento de la playa frente a los temporales considerados en este estudio es primordial conocer la hidrodinámica de la zona en cuestión y estudiar cómo ésta afecta al tramo de la playa de interés. A lo largo de los años se han propuesto diversas teorías sobre todos los fenómenos que intervienen en la generación y la propagación del oleaje. Todo este conocimiento adquirido se ha ido implementando en diferentes modelos que pueden ser resueltos con la ayuda de ordenadores para solucionar los problemas reales.

En el análisis de los procesos hidrodinámicos, la modelización se utiliza para simular los principales fenómenos en las regiones costeras. Existe una gran variedad de modelos en la actualidad y se clasifican según se describe a continuación:

- Modelos físicos: se obtienen a partir de modelos de laboratorio elaborados a una escala apropiada para investigar los procesos relevantes.
- Modelos numéricos: se basan en códigos computacionales que tratan de describir, a partir de un sistema de ecuaciones matemáticas, lo que sucede en la realidad.
- Modelos compuestos: uso integrado y equilibrado de modelos físicos y numéricos.

Los modelos utilizados en este estudio pertenecen a la familia de los modelos numéricos. La rápida evolución de la ingeniería computacional ha permitido desarrollar un gran número de modelos útiles para resolver problemas de hidrodinámica costera. Se usan cuando no es factible resolver analíticamente las ecuaciones que se cree que gobiernan los procesos físicos. Cuando el sistema a modelar es complejo, las ecuaciones se discretizan en el tiempo y el espacio y se resuelven mediante ordenadores después de imponer un conjunto de condiciones de contorno. Sin embargo, la precisión de la predicción realizada depende en gran medida de las condiciones de contorno aplicadas, los parámetros del modelo y el esquema numérico.

Existen dos categorías principales de modelos numéricos en el campo del oleaje en aguas profundas (Battjes, 1994): los modelos *phase-resolving* y los modelos *phase-averaged*.

Los modelos *phase-resolving* se basan en la continuidad de las ecuaciones de masa y momento. Tienen la ventaja que pueden representar el *shoaling* (disminución de la altura de ola por la acción del fondo marino), la difracción y los efectos de refracción, reflexión y disipación de energía. De este modo, permiten calcular la superficie libre en cada intervalo de tiempo considerado. Sin embargo, dado que el espacio requerido y las resoluciones de tiempo deben ser del orden de una pequeña fracción de longitud de onda y período, los modelos de oleaje *phase-resolving* no son adecuados para la aplicación en grandes áreas de la costa debido al elevado coste computacional asociado.

Por otro lado, los modelos *phase-averaged* se basan en el balance de la ecuación espectral de energía y calculan el espectro de energía para cada punto de la malla de cálculo en lugar de la

elevación de la superficie libre. Estos modelos de oleaje son muy útiles para la predicción multidireccional de la transformación del oleaje en dominios de estudio de grandes dimensiones.

Por otro lado, los procesos dinámicos que existen en las regiones costeras se generan por una serie de factores, bajo la influencia de los cuales el movimiento fluido del agua se manifiesta como corrientes costeras, mareas astronómicas, oleaje, mareas meteorológicas y tsunamis, entre otros.

En la costa existen dos zonas claramente diferenciadas: la zona de aguas someras o zona costera, y la zona de aguas profundas. La principal diferencia entre ellas es la presencia de dos restricciones físicas, el fondo del mar a una profundidad relativamente poco profunda y la línea de la costa, que determinan el movimiento del agua. La zona cercana a la costa se define como la región que se extiende desde la zona terrestre afectada por el remonte de las olas después de romper hasta un límite definido por detrás de la zona de rompientes, que depende de un contexto específico (Horikawa, 1988). Entre estos contornos también se pueden distinguir otras zonas, tal y como se muestra en la Figura 51. Entre las más relevantes se encuentran la zona de rompientes, que es la zona donde las olas incidentes rompen, y la *surf zone*, definida como la región comprendida entre la zona de rompientes y la línea de orilla.

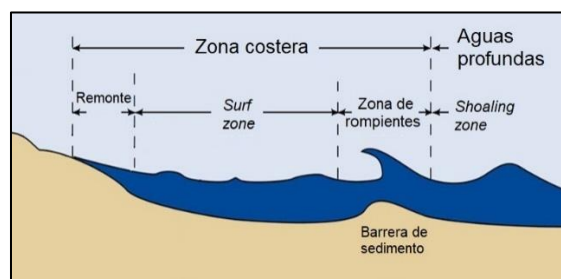


Figura 51. Descripción de las diferentes zonas en regiones costeras.

En un contexto general, se puede afirmar que el principal factor en la generación de olas es el viento, provocado por la presión que éste ejerce sobre la superficie del océano. A medida que estas olas viajan desde aguas profundas a regiones más cercanas a la costa, se vuelven más no-lineales y dispersivas, transfiriendo energía desde el pico del espectro a frecuencias cada vez más altas. Finalmente, la proximidad del fondo del mar provoca la ruptura de las olas, produciendo un aumento considerable del nivel de turbulencia y generando diferentes tipos de corrientes, que pueden llegar a extenderse más allá de la *surf zone*.

Sin embargo, el estudio de los procesos hidrodinámicos no es un trabajo fácil. Las escalas del oleaje, de las corrientes y de la turbulencia tienden a sobreponerse, dando lugar a la interacción de estos tres tipos de flujos. Dado que cada uno de los flujos individuales son de naturaleza no-lineal, su interacción se vuelve bastante compleja. El procedimiento usual seguido para comprender las ecuaciones gobernantes en esta zona es descomponer todas las variables de estado en contribuciones de corrientes, ondas y turbulencias, y luego a partir de discretizaciones temporales se aísla el fenómeno deseado.

En el presente estudio, el modelo escogido para propagar la información recopilada por la Boya de Barcelona II desde aguas profundas a la zona costera de la celda litoral es el modelo SWAN (descrito en el capítulo 4.1.4.), que se trata de un modelo *phase-averaged*.

A la hora de escoger el modelo más adecuado se ha tenido en cuenta el ámbito de estudio (celda litoral Port Ginesta – Puerto de Barcelona), donde el efecto de fondo es significativo, y que éste debe integrar todos los procesos que afectan a la evolución del oleaje y son relevantes a esta escala. Según Battjes, estos procesos son los que se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Importancia de los procesos que afectan a la evolución de las olas en aguas oceánicas y costeras. Fuente: Battjes, 1994.

Proceso	Aguas Oceánicas	Aguas costeras		
		Plataforma oceánica	Costa	Puerto
Generación por viento	●●●	●●●	●	○
Interacción por Cuadruletes	●●●	●●●	●	○
White-capping	●●●	●●●	●	○
Fricción de fondo	○	●●	●●	○
Refracción de la corriente	○/●	●	●●	○
Refracción de fondo / shoaling	○	●●	●●●	●●
Rotura	○	●	●●●	●
Interacción por Triadas	○	○	●●	●
Reflexión	○	○	●/●●	●●●
Difracción	○	○	●	●●●
●●● = dominante ●● = significativa pero no dominante ● = de poca importancia ○ = despreciable				

Es por esta razón que se escoge el modelo SWAN, ya que puede ser aplicado a cualquier escala y está específicamente diseñado para aplicaciones costeras (Booij et al., 1999; Ris et al., 1999)

Por otro lado, el oleaje incidente en una playa provoca cambios en su morfología (cambios en la pendiente, volumen de sedimento, anchura de playa, etc.) y dependiendo de su magnitud estos cambios serán más o menos graves una vez la tormenta vaya perdiendo intensidad hasta desaparecer.

XBeach (descrito en el capítulo 4.1.5) es el software empleado que, a partir de los resultados de propagación del oleaje hasta aguas someras obtenidos con SWAN, se encarga de analizar la respuesta morfológica de la playa frente a la acción de las olas. Este es un modelo que combina los enfoques de los modelos *phase-resolving* y *phase-averaged*. La determinación de la erosión/acumulación e inundación (aspectos clave cuando se pretende analizar la respuesta morfodinámica frente al oleaje incidente en una playa, tal y como se ha descrito en el capítulo 2), se puede estimar con modelos numéricos bidimensionales que resuelvan la hidrodinámica básica en la zona cercana a la costa. Esta zona es altamente dinámica y coexisten una serie de interacciones que requieren resolver procesos hidrodinámicos y morfológicos de forma acoplada. En consecuencia, esta es la hipótesis de partida para escoger el modelo XBeach como herramienta de evaluación del impacto.

4.1.1. ANÁLISIS HIDRODINÁMICO

Tal y como se ha visto en el capítulo 2, se tienen en cuenta todas las direcciones de procedencia de oleaje que afectan al dominio del estudio, así como el clima extremal de oleaje asociado con los períodos de retorno de 1, 5 y 25 años. Además, también se tienen en cuenta distintos escenarios de sobre elevación del nivel del mar relacionados con los cambios provocados por la combinación de las mareas astronómica y meteorológica (Tabla 6). Para realizar este análisis se utiliza el modelo SWAN, tal y como se ha descrito con anterioridad. En resumen, en la Tabla 17 se muestran los escenarios hidrodinámicos considerados.

Tabla 17. Escenarios hidrodinámicos considerados.

T_R (años)	Sobreelevación NMM (m)	SE (135°)		SSE (157.5°)		S (180°)		SSW (202.5°)	
		Hs	T_p	Hs	T_p	Hs	T_p	Hs	T_p
1	0, I, II	1.07	5.31	1.02	5.21	1.07	5.31	1.34	5.81
5	0, I, II	2.30	7.21	2.19	7.07	2.30	7.21	2.87	7.89
25	0, I, II	2.89	7.90	2.75	7.75	2.89	7.90	3.61	8.64

4.1.2. ANÁLISIS MORFODINÁMICO

En segundo lugar, se realiza un análisis morfodinámico en la zona en la que se realiza la extracción de la arena con el objetivo de determinar la cantidad de sedimento disponible en la playa. A partir de las condiciones de oleaje presentes en la playa de interés obtenidas con el modelo SWAN, se considera un escenario inicial en el que la playa se encuentra en las condiciones actuales, con el fin de comprobar cuál es su comportamiento en la actualidad y si responde adecuadamente frente a la acción del oleaje. A continuación, se aplican los cambios en la topografía de la playa provocados por las extracciones de sedimento y se realizan las simulaciones que muestran el comportamiento de la playa en términos de inundación y erosión/acumulación frente a los temporales y escenarios de sobreelevación del nivel del mar descritos en la Tabla 16. En este caso, el análisis se realiza con el modelo XBeach.

En este estudio se proponen 3 métodos de extracción de arena en el Tramo 1 de la playa de Castelfels. A continuación, se describe cada uno de ellos.

- A. Extracción de 40 cm de arena en toda el área comprendida entre las dunas y un límite situado a 15 m de la actual línea de orilla (Figuras 52 y 53).



Figura 52. Delimitación del área definida por el final de las dunas y un límite situado a 15 m de la orilla.

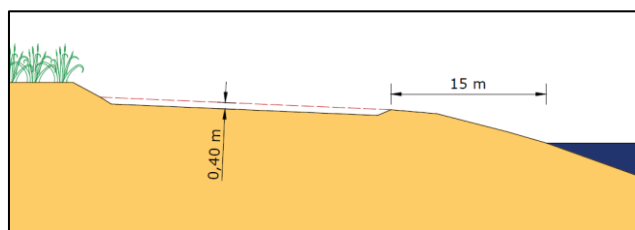


Figura 53. Sección del perfil de playa resultante realizando una zanja de 40 cm.

La distancia que separa los dos límites establecidos es variable a lo largo del tramo de playa de interés, siendo su valor mínimo igual a 55 m y el máximo igual a 95 m. Por tanto, la anchura media considerada es igual a 75 m y el volumen de arena que se puede llegar a extraer son 105.000 m³.

- B. Extracción de 70 cm de arena en el área comprendida entre las dunas y un límite separado 15 m de la actual línea de orilla. (Figuras 52 y 54).

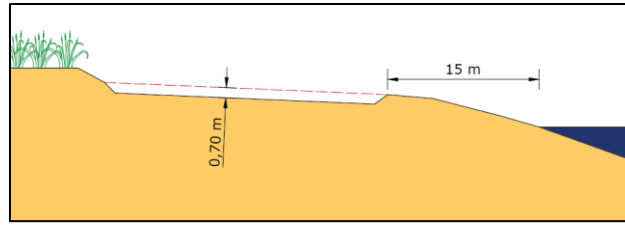


Figura 54. Sección del perfil de playa resultante realizando una zanja de 70 cm.

En este caso, el volumen de arena extraíble es igual a 183.750 m^3 .

C. Extracción de la arena comprendida entre la actual línea de orilla y la del año 2004 (Figuras 55 y 56).



Figura 55. Delimitación del área comprendida entre la línea de orilla actual (azul) y la línea de orilla del año 2004 (rojo).

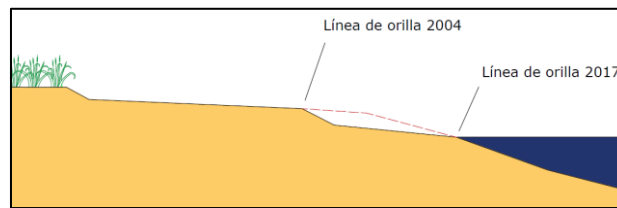


Figura 56. Perfil de playa resultante con un retroceso de la línea de orilla.

Igual que en el caso anterior, la distancia entre los dos límites definidos es variable a lo largo del tramo de interés. La separación mínima es igual a 20 m y la máxima es igual a 50 m, de modo que la anchura media considerada es igual a 35 m. En consecuencia, la cantidad de arena en este caso alcanza los 36.750 m^3 .

Los modos de extracción A y B consisten en retirar la arena contenida en una zanja contenida entre los límites anteriormente descritos de 40 y 70 cm de profundidad respectivamente. La extracción contempla unos taludes a lado y lado de la zanja para garantizar la estabilidad de las zonas adyacentes. El margen de 15 m respecto la línea de orilla se ha dejado como zona de seguridad para intentar que la playa se vea afectada lo menos posible por el rebaje del nivel.

Ambos métodos intentan evitar el impacto social que provoca el retroceso de la línea de orilla tras el paso de la maquinaria y los equipos necesarios. Los habitantes del municipio pueden entender que esta actuación les está quitando parte de su playa para llevarla a la de otro municipio, mientras que otras peticiones para mejorar los equipamientos en la misma no han obtenido respuesta alguna por parte de la Demarcación de Costas.

Por otro lado, el escenario C consiste en retirar la arena acumulada entre los años 2004 y 2017. La extracción se realiza dejando una suave pendiente entre las dos líneas de orilla con el objetivo de atenuar el impacto del oleaje sobre la nueva línea de costa. Esta extracción no tiene en cuenta este impacto, sino que entiende la zona de acumulación como territorio ganado al mar en el

período comprendido entre el 2004 y el 2017, procedente de otra zona de la que se ha erosionado situada dentro de la misma celda litoral.

Comparando los volúmenes potenciales que se pueden llegar a extraer con la recopilación de los trasvases de arena realizados en la costa española (Tabla 1) se puede ver que el sedimento teóricamente disponible en Castelldefels supera con creces la gran mayoría de trasvases realizados. Además, se observa que con los patrones de extracción A y B, el volumen de sedimento disponible podría llegar a abastecer todas las playas de la ciudad de Málaga. Ello da una idea de lo importante que es conocer la cantidad de sedimento disponible para gestionar los trasvases de arena de la mejor manera posible.

Con el fin de esclarecer las condiciones consideradas, en la Tabla 18 se muestran los distintos casos morfodinámicos.

Tabla 18. Escenarios morfodinámicos

Perfil de playa actual									
T _R (años)	Sobreelevación SNM (m)	SE (135°)		SSE (157.5°)		S (180°)		SSW (202.5°)	
		Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp
1	0, I, II	1.07	5.31	1.02	5.21	1.07	5.31	1.34	5.81
5	0, I, II	2.30	7.21	2.19	7.07	2.30	7.21	2.87	7.89
25	0, I, II	2.89	7.90	2.75	7.75	2.89	7.90	3.61	8.64
Perfil de playa "A"									
T _R (años)	Sobreelevación SNM (m)	SE (135°)		SSE (157.5°)		S (180°)		SSW (202.5°)	
		Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp
1	0, I, II	1,07	5,31	1,02	5,21	1,07	5,31	1,34	5,81
5	0, I, II	2,30	7,21	2,19	7,07	2,30	7,21	2,87	7,89
25	0, I, II	2,89	7,90	2,75	7,75	2,89	7,90	3,61	8,64
Perfil de playa "B"									
T _R (años)	Sobreelevación NMM (m)	SE (135°)		SSE (157.5°)		S (180°)		SSW (202.5°)	
		Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp
1	0, I, II	1,07	5,31	1,02	5,21	1,07	5,31	1,34	5,81
5	0, I, II	2,30	7,21	2,19	7,07	2,30	7,21	2,87	7,89
25	0, I, II	2,89	7,90	2,75	7,75	2,89	7,90	3,61	8,64
Perfil de playa "C"									
T _R (años)	Sobreelevación SNM (m)	SE (135°)		SSE (157.5°)		S (180°)		SSW (202.5°)	
		Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp
1	0, I, II	1,07	5,31	1,02	5,21	1,07	5,31	1,34	5,81
5	0, I, II	2,30	7,21	2,19	7,07	2,30	7,21	2,87	7,89
25	0, I, II	2,89	7,90	2,75	7,75	2,89	7,90	3,61	8,64

4.1.3. DATOS DISPONIBLES

Además del oleaje, los modelos numéricos necesitan información batimétrica y topográfica para conocer la profundidad o la elevación de cada punto de la región a modelar.

La implementación del modelo SWAN debe realizarse en una región extensa, con el objetivo de evitar interacciones entre el oleaje y la influencia de las condiciones de contorno, las cuales se han considerado uniformes (todos los contornos de la región a modelar tienen la misma altura de ola y dirección de procedencia del oleaje) y, por tanto, no acaban de ser del todo realistas. En cambio, el modelo XBeach requiere de un dominio más pequeño y una batimetría muy precisa, ya que de este modo los resultados de la erosión y de la inundación son más reales.

Por un lado, la información topográfica para generar el modelo digital de elevaciones tiene una resolución espacial de 2 m y se obtiene a partir de imágenes LIDAR distribuidas por bloques de 2x2 kilómetros, en formato LAS. Fueron tomadas en 2011 y están disponibles en el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC).

Por otro lado, la información batimétrica se construye a partir de la digitalización de cartas náuticas y datos cartográficos del Área Metropolitana de Barcelona (AMB) a escala 1:1.000, que se han corregido manualmente para tener una mayor precisión a la hora de definir la línea de orilla con ArcGIS10.5. Los datos batimétricos digitalizados cubren toda la celda litoral y varios kilómetros mar adentro, hasta llegar a una profundidad aproximadamente de 700 m.

La malla de cálculo es del tipo curvilíneo, de densidad variable (Figura 58). La opción de malla curvilínea permite una mejor captura de las tendencias del modelo digital del terreno con un número inferior de nodos (LIM UPC).

ANIDAMIENTO DEL MODELO

Tal y como se ha mencionado con anterioridad, el modelo SWAN necesita una gran área para su implementación, la cual lleva asociada un elevado coste computacional si tiene que ser cubierta por una malla muy fina (condición necesaria en el caso de XBeach). Para reducir el coste computacional del modelo sin perder resolución espacial, se realiza el anidamiento de dos mallas: una que cubre toda la celda litoral y otra focalizada en el lugar de extracción de la playa de Castelldefels, tal y como se puede ver en la Figura 57.



Figura 57. Localización de las mallas computacionales utilizadas en los modelos SWAN y XBeach.

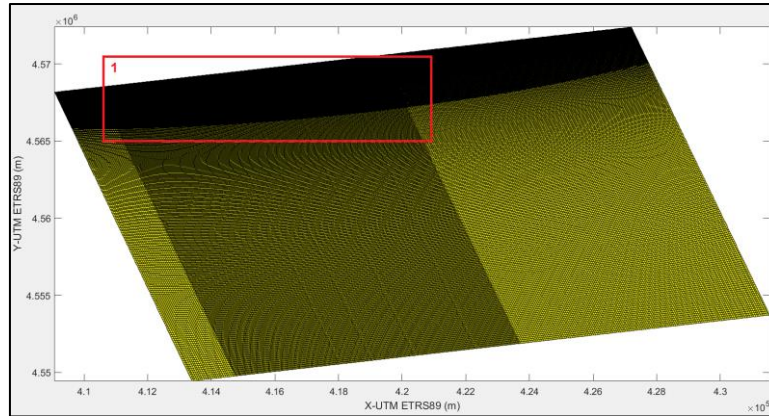


Figura 58. Representación de las mallas de cálculo de los modelos SWAN y XBeach de la Figura 53.

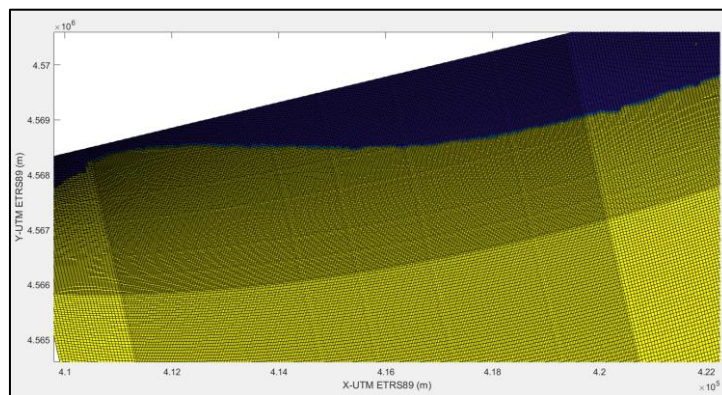


Figura 59. Imagen 1 de la Figura 58. Ampliación de la zona con mayor densidad de malla.

En las Figuras 58 y 59 se representan las mallas de cálculo utilizadas en los modelos SWAN y XBeach, en la que además se pueden diferenciar las zonas de las mallas con diferentes densidades. La playa emergida queda representada de color azul, mientras que la playa sumergida de color amarillo.

El dominio de cálculo del modelo SWAN tiene una longitud de 18.500 m y un ancho de 19.000 m y se ubica entre el macizo del Garraf y la desembocadura del río Llobregat. La medida de las celdas es del orden de 135 x 60 m en el ámbito de menor densidad de malla, mientras que en el área de mayor interés pasan a ser de 65 x 60 m.

Por otro lado, el dominio de cálculo de XBeach es menor, con una longitud de 4.000 m y 2.500 m de ancho. Comprende áreas de la playa tanto emergidas como sumergidas y el tamaño de la celda pasa a ser de 135 x 30 m en la zona de menor densidad y de 65 x 30 m en la de mayor densidad. Las zonas urbanizadas se considera zonas rígidas que no pueden ser erosionadas.

4.1.4. MODELO SWAN

En el presente capítulo se describe el modelo numérico SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*), utilizado en este estudio para la propagación de los datos de oleaje de aguas profundas a aguas someras y la estimación de los parámetros de oleaje en aguas someras. Es el modelo más utilizado para calcular oleaje irregular en zonas costeras y ha sido validado por un gran número de estudios. El código es de dominio público a través de la *Delft University of Technology*.

Se trata de un modelo de tercera generación que describe la evolución del espectro de energía del oleaje teniendo en cuenta datos de vientos, corrientes y batimetría. SWAN incluye la

posibilidad de considerar una gran cantidad de los procesos a los que se ve sometido el oleaje durante su propagación, calculando procesos de generación, disipación e interacciones no-lineales.

ECUACIÓN DE BALANCE DE LA ACCIÓN DEL OLEAJE

SWAN se basa en una discretización en diferencias finitas de la ecuación de balance de la acción del oleaje (Booij et al., 1999), que tiene en cuenta la interacción entre olas y corrientes. Se trata de una función basada en el balance de energía E , que varía en el espacio x, y, z y el tiempo t , y es función de la frecuencia absoluta ω y de la dirección θ , según se indica en la ecuación 4.1.

$$E(\omega, \theta; x, y, z) \quad (4.1)$$

En presencia de corrientes se escoge un parámetro más relevante para la propagación del oleaje, la acción A , porque en corrientes no uniformes, la energía de ola no se conserva debido al intercambio de energía entre olas y corrientes. La acción del oleaje se define según las expresiones 4.2, 4.3 y 4.4 (Whitham y de Vries, 1965):

$$A(x, y, z, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, z, t, \theta)}{\sigma(x, y, z, t)} \quad (4.2)$$

Siendo:

$$S_w(x, y, z, t, \theta): \text{densidad espectral de energía del oleaje} \quad (4.3)$$

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kh)}: \text{frecuencia intrínseca del oleaje} \quad (4.4)$$

Donde k es el número de onda y h la profundidad.

La acción, en cambio, sí que se conserva durante la propagación (Phillips, 1977). En consecuencia, la ecuación de balance de acción de ola viene dada por la ecuación 4.5:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_{gx} A}{\partial x} + \frac{\partial c_{gy} A}{\partial y} + \frac{\partial c_{gz} A}{\partial z} + \frac{\partial c_{\theta} A}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (4.5)$$

Donde el único parámetro todavía por definir es c_g , la celeridad de grupo para cada dirección.

El primer término de la ecuación 4.5 representa la variación en el tiempo de la acción del oleaje, el segundo y el tercero modelan el efecto del *shoaling* producido por el fondo marino, el cuarto término describe los cambios de la frecuencia relativa debido a las corrientes y el quinto representa la refracción y la difracción. El término de la derecha de la ecuación es el término fuente, donde se incluyen los efectos de generación, disipación e interacciones no-lineales entre olas, tal y como se indica en la expresión 4.6:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (4.6)$$

Siendo cada uno de los términos:

- S_{in} : energía suministrada por el viento.
- S_{nl} : transferencia de energía a través de las interacciones no-lineales (triadas y cuádrupletas). Son transferencias de energía entre frecuencias, originadas por la interacción ola-ola cuando entran en resonancia grupos de tres olas en aguas intermedias o someras (tríadas) o de cuatro en aguas profundas (cuadúpleta).
- S_{ds} : disipación (fricción con el fondo, rotura y whitecapping).

De los términos fuente anteriores de la ecuación 4.6, Battjes (1994) argumenta que la fricción con el fondo, la rotura y las interacciones entre triadas son los procesos que dominan en aguas

someras. Por tanto, en este estudio sólo se consideran estos términos. A continuación, se describen con más detalle cada uno de ellos.

INTERACCIONES NO-LINEALES ENTRE OLAS

En el modelo SWAN las interacciones no-lineales son de dos tipos: interacciones onda-onda en cuádrupletas e interacciones onda-onda en triadas, y tal y como se ha mencionado anteriormente, sólo se consideran las interacciones del segundo tipo. Eldeberky y Battjes (1995) presentaron una expresión simplificada de energía (4.7) para este tipo de interacciones que es usado en el modelo SWAN (Ris, 1997):

$$S_{nl_3}(\omega, \theta) = S_{nl_3}^+(\omega, \theta) + S_{nl_3}^-(\omega, \theta) \quad (4.7)$$

Donde los términos $S_{nl_3}^+(\omega, \theta) + S_{nl_3}^-(\omega, \theta)$ se definen a partir de las ecuaciones 4.8 y 4.9:

$$S_{nl_3}^+ = \max\{0, \alpha_{EB} 2\pi c_g J^2 |\sin(\beta) / \{E^2(\omega/2, \theta) - 2E(\omega/2, \theta) \cdot E(\omega, \theta)\}\} \quad (4.8)$$

$$S_{nl_3}^- = -2S_{nl_3}(\omega, \theta) \quad (4.9)$$

En las cuales:

- α_{EB} es un coeficiente que controla la magnitud de las interacciones.
- β es la bifase, aproximada por $\beta = -\pi/2 + \pi/2 \tanh(0.2/U_r)$, donde U_r es el número de Ursell dado por Ris et al. (1999).
- J es el coeficiente de interacción, dado por Madsen y Sorensen (1993).

DISIPACIÓN

Los términos considerados correspondientes a la disipación del oleaje son los siguientes:

- Fricción con el fondo (S_{dsb}): se puede modelar la pérdida de energía mediante diferentes modelos, aunque dada la variabilidad en las características de los fondos marinos, SWAN implementa versiones simples de los mismos. Su definición se indica en la expresión 4.10.

$$S_{dsb}(\omega, \theta) = -C_b \cdot \frac{\omega^2 E(\omega, \theta)}{g^2 \sinh^2(kh)} \quad (4.10)$$

Por otro lado, la expresión utilizada en este caso para definir el coeficiente C_b ha sido la ecuación 4.11 de Madsen et al., (1988):

$$C_b = \frac{f_w g}{\sqrt{2}} U_{rms} \quad (4.11)$$

Los parámetros de la ecuación 4.11 son los siguientes: U_{rms} es la raíz cuadrada de la media aritmética de los valores de la velocidad de corriente elevados al cuadrado, y el factor de fricción f_w viene dado por las expresiones de Jonsson (1966), Jonsson y Carlsen (1976) y Jonsson (1980).

- Rotura (S_{dsbr}): La disminución de la profundidad provoca un aumento de la altura del oleaje. Si esta altura se vuelve demasiado grande, las olas rompen y se produce una gran disipación de energía. Este efecto es muy relevante en aguas someras y existen diferentes modelizaciones. La escogida en este estudio es la expresión de Battjes y Janssen (1978), complementada con la expresión de Eldeberky y Battjes (1995) (ecuación 4.12):

$$S_{dsbr} = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\omega, \theta) = - \frac{\alpha B J Q_b \bar{\omega}}{\beta^2 \pi} E(\omega, \theta) \quad (4.12)$$

Donde los parámetros se definen como:

- α : constante numérica (Holthuijsen et al., 1993).
- B : el modelo SWAN utiliza la expresión de Komen et al. (1984).
- Q_b : fracción de olas rompiendo.
- $\bar{\omega}$: frecuencia angular promedio.
- β : se expresa como $\beta = H_{rms}/H_{max}$, siendo H_{rms} la altura de ola media cuadrática (que se calcula como la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de las alturas de ola individuales de un registro de oleaje) y H_{max} la altura máxima de ola.

En resumen, en la Tabla 19 se muestran los fenómenos considerados en los términos fuente S de la expresión 4.5.

Tabla 19. Fenómenos considerados en el término fuente S .

Modelo propuesto para los términos sumidero de energía (S)		
Interacciones no lineales entre olas	Disipación	
- Triadas	- Fricción con el fondo	- Rotura
S_{nl_3}	S_{dsb}	S_{dsbr}

4.1.4.1 ENTRADAS DEL MODELO

Además de la batimetría descrita anteriormente en el capítulo 4.1.3., SWAN también permite considerar sobreelevaciones del nivel del mar. En este caso, se tienen en cuenta las mencionadas en la Tabla 5.

4.1.4.2. CONDICIONES DE CONTORNO

En el modelo SWAN las condiciones de contorno se imponen en las aristas de la malla de mayor superficie, que en la Figura 60 se representan de color verde. Para cada caso considerado, sobre dichas aristas incide el oleaje obtenido a partir de Puertos del Estado, la magnitud del cual se mantiene constante durante toda la duración de la tormenta. Por ejemplo, si se considera una tormenta procedente del SE y con un período de retorno igual a 1 año, sobre dichos contornos se genera un oleaje con una dirección de propagación de 135° respecto del norte y una altura de ola y período pico igual a 1,07 m y 5,31 s respectivamente (Tabla 16), y que SWAN se encarga de propagar hasta la línea de orilla, considerando los fenómenos de la Tabla 15.

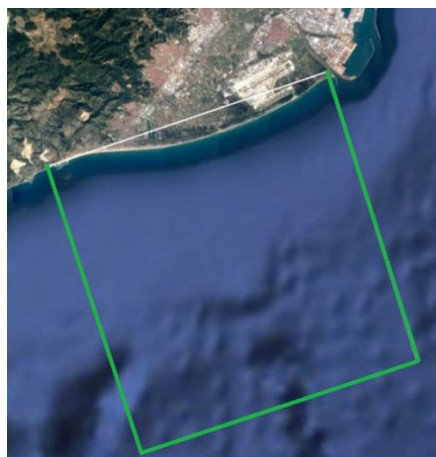


Figura 60. Localización de los contornos del modelo SWAN (aristas de color verde).

4.1.4.3. SALIDAS DEL MODELO

SWAN calcula resultados en todos los nodos de la malla de cálculo y los agrupa en un archivo en formato “.mat”. Además, si se desea se le pueden especificar unos puntos en concreto donde el programa genera los *outputs* que se le indiquen. En este caso, se requiere al modelo que genere resultados del tipo espectral en unos puntos en concreto, ya que tal y como se ha descrito anteriormente, estas salidas serán los *inputs* que necesitará el modelo XBeach para calcular la respuesta morfodinámica de la playa. Se trata de un *output* bidimensional (frecuencia-dirección) que general el módulo espectral del modelo.

En consecuencia, los *outputs* se ubican en la zona cercana a la costa frente al tramo de playa de interés (Figura 61), las coordenadas de los cuales se muestran en la Tabla 20.



Figura 61. Ubicación de los outputs del modelo SWAN.

Tabla 20. Ubicación de los outputs generados por SWAN.

SALIDAS MODELO SWAN	COORDENADAS	
	X – UTM ETRS89 (m)	Y – UTM ETRS89 (m)
P1	410612.103	4566008.60
P2	414018.594	4566152.48
P3	417425.137	4566296.36

4.1.4.4. POSTPROCESO

El modelo carece de un visor de los resultados que genera. Por tanto, se utiliza Matlab para la representación de dichos resultados, así como para su tratamiento y procesado.

4.1.4.5. ESQUEMA DEL MODELO

La figura 62 resume el esquema general de funcionamiento del modelo SWAN.

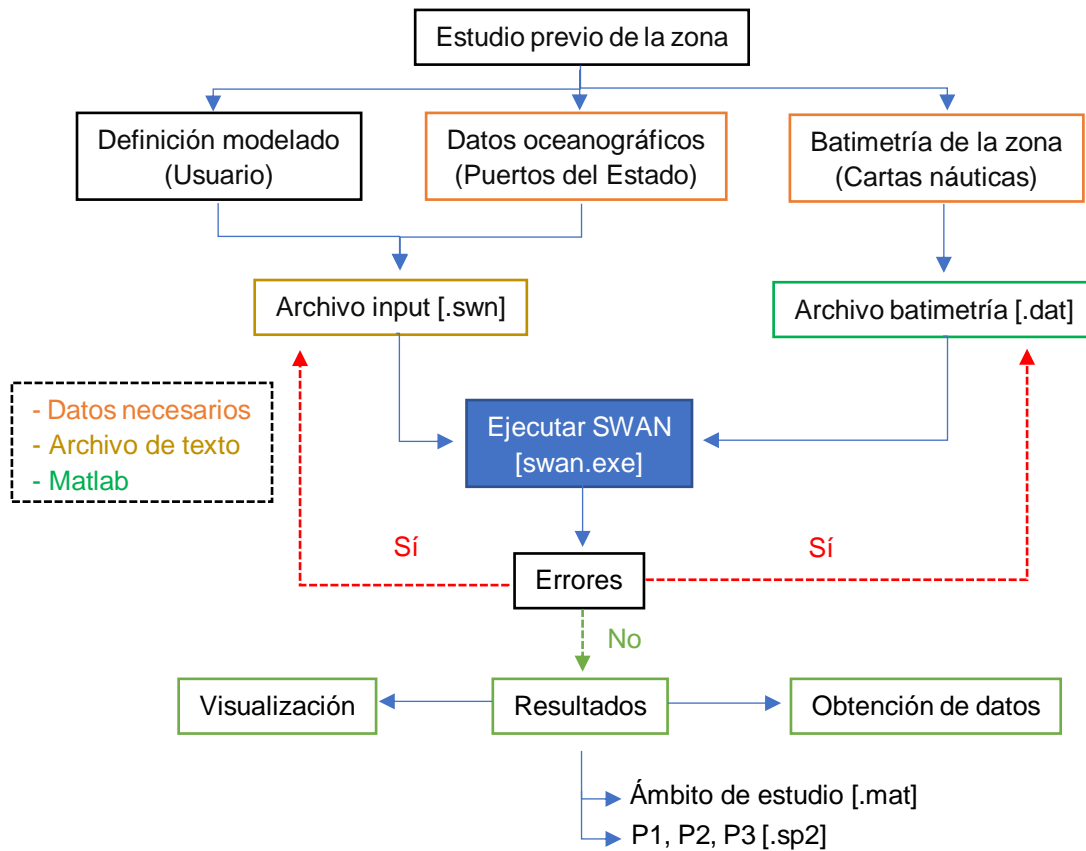


Figura 62. Esquema general de funcionamiento del modelo SWAN.

4.1.5. MODELO XBEACH

XBeach (eXtreme Beach behaviour, Roelvink et al., 2009) es un modelo capaz de simular la hidrodinámica en aguas someras a una escala temporal de grupos de olas. También permite simular las corrientes inducidas por el oleaje en combinación con el transporte de sedimento y la morfología resultante. En este caso, se trata de un modelo horizontal en 2D, lo que significa que resuelve la ecuación de balance de acción del oleaje en el espacio x-y y el valor de las variables en cada punto de la malla computacional se obtiene para una profundidad promedio.

ECUACIÓN DE BALANCE DE ACCIÓN DEL OLEAJE

Después de interpretar las condiciones de contorno y las condiciones iniciales, XBeach trabaja con la ecuación de balance de acción del oleaje que resuelve la propagación y el decaimiento de las ondas cortas. Se trata de una ecuación muy parecida a la expresión 4.5., pero en este caso en 2 dimensiones, según se indica en la ecuación 4.13:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_{gx}A}{\partial x} + \frac{\partial c_{gy}A}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta}A}{\partial \theta} = -\frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma} \quad (4.13)$$

Los términos de la derecha de la ecuación ahora pasan a ser los siguientes términos de dispersión:

- D_w : dispersión provocada por la rotura de la ola. Este es el término fuente para la ecuación de balance del *roller*, que es el volumen de fluido separado del perfil de la ola

y colocado en su parte frontal, que se genera al romper la ola y que se caracteriza por la existencia de gran turbulencia y de mezcla de agua y aire.

- D_f : dispersión provocada por la fricción con el fondo marino.
- D_v : dispersión provocada por la vegetación.

BALANCE DE ENERGÍA DEL ROLLER

En el punto en que las olas comienzan a romper es donde se esperan los gradientes más fuertes de tensiones que acaban provocando el remonte del oleaje y las corrientes litorales. En la práctica, existe un retraso, porque la energía de ruptura de las olas se almacena temporalmente en *rollers* en la superficie. La disipación del oleaje provocada por la rotura D_w es un término sumidero en la ecuación de equilibrio de la acción de onda corta y un término fuente en el balance de energía del *roller* E_r . La expresión del balance de energía queda representada en la ecuación 4.14:

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial E_r \cos(\theta)}{\partial x} + \frac{\partial E_r \sin(\theta)}{\partial y} = D_w - D_r \quad (4.14)$$

Donde la disipación de energía de la ola del *roller* es calculada por el trabajo realizado por la tensión tangencial entre el *roller* y ola (Deigaard, 1993), según se indica en la expresión 4.15.

$$D_r = c\tau_r \quad (4.15)$$

Donde τ_r representa la tensión tangencial promediada del oleaje entre la ola en rotura y la superficie del agua, que se aproxima mediante la expresión de Duncan (1981) (4.16):

$$\tau_r = \frac{\rho_w g A_r \sin(\beta_{roller})}{L} \quad (4.16)$$

Siendo β_{roller} la pendiente del frente de onda, L la longitud de onda correspondiente a la frecuencia media intrínseca y A_r es el área del *roller*, el cual se relaciona con la energía de *roller* mediante la expresión propuesta por Svendsen (1984).

TENSOR DE RADIACIÓN

El tensor de radiación forma la conexión entre la ecuación de balance de la acción de la onda corta y las ecuaciones de aguas someras. Se define como el exceso de *momentum* generado por la acción del oleaje. El tensor de radiación se obtiene de la ecuación de balance de acción de oleaje mediante la conversión de la acción del oleaje en densidad de energía del oleaje, multiplicándola por la frecuencia intrínseca, según se indica en la ecuación 4.17.

$$S_w(x, y, t, \theta) = A(x, y, t, \theta) \cdot \sigma(x, y, t) \quad (4.17)$$

Las componentes del tensor de radiación también se obtienen directamente de la energía de la ecuación de balance de la acción del oleaje, por lo que se determinan mediante las expresiones 4.18, 4.19 y 4.20:

$$S_{xx,w}(x, y, t) = \int \left(\frac{c_g}{c} (1 + \cos^2 \theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta \quad (4.18)$$

$$S_{xy,w}(x, y, t) = S_{yx,w}(x, y, t) \int \sin \theta \cos \theta \frac{c_g}{c} S_w d\theta \quad (4.19)$$

$$S_{yy,w}(x, y, t) = \int \left(\frac{c_g}{c} (1 + \sin^2 \theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta \quad (4.20)$$

Donde c es la celeridad de onda o velocidad de propagación del oleaje y c_g es la celeridad de grupo o velocidad de propagación de la energía del oleaje.

El balance de energía del *roller* a su vez también es responsable de la formación del tensor de radiación. La energía del *roller* primero se convierte en energía del oleaje para cada dirección a partir de la siguiente expresión 4.21:

$$S_r(x, y, t, \theta) = \frac{\partial E_r(x, y, t)}{\partial \theta} \quad (4.21)$$

De nuevo la energía del oleaje para cada dirección se descompone en componentes del tensor de radiación, tal y como se muestra a continuación en las ecuaciones 4.22, 4.23 y 4.24:

$$S_{xx,r}(x, y, t) = \int \cos^2 \theta S_r d\theta \quad (4.22)$$

$$S_{xy,r}(x, y, t) = \int \sin \theta \cos \theta S_r d\theta \quad (4.23)$$

$$S_{yy,r}(x, y, t) = \int \sin^2 \theta S_r d\theta \quad (4.24)$$

FUERZAS INDUCIDAS POR LAS OLAS

Finalmente, el tensor de radiación acaba convirtiéndose en las fuerzas inducidas por las olas (F_x y F_y), definidas por las expresiones 4.25 y 4.26. Éstos son términos de forzamiento de las ecuaciones no-lineales en aguas someras.

$$F_x = - \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) : \text{fuerzas perpendiculares a la orilla} \quad (4.25)$$

$$F_y = - \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} \right) : \text{fuerzas paralelas a la orilla} \quad (4.26)$$

ECUACIONES DE AGUAS SOMERAS

Las ecuaciones responsables de las variaciones de la superficie del agua, incluyendo oleaje infragravitatorio (ondas largas de periodos entre 30 y 600 s) y corrientes inducidas por oleaje no estacionario, son las ecuaciones de aguas someras 4.27, 4.28 y 4.29.

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f_v^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} + \frac{F_{v,x}}{\rho h} \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} - f_u^L - u_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} + \frac{F_{v,y}}{\rho h} \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0 \quad (4.29)$$

Donde:

- η : nivel del agua
- f : coeficiente de Coriolis
- τ_{bx}^E y τ_{by}^E : tensiones tangenciales en el fondo marino
- τ_{sx} y τ_{sy} : tensiones tangenciales del viento sobre la superficie del mar.

- $F_{v,x}$ y $F_{v,y}$: tensiones inducidas por la vegetación. Este término es importante cuando se realizan estudios que analizan el efecto que tiene la vegetación sobre el oleaje incidente. Este aspecto no es importante en el trasvase de arena entre playas, de modo que no se tiene en cuenta.
- v_h : viscosidad horizontal asociada con mezcla lateral, definida en la expresión 4.30. Esta viscosidad está relacionada con los eddies inducidos por rotura del oleaje (Battjes, 1975) y una viscosidad de referencia definida por el usuario $v_{h,back}$, cuyo valor por defecto es $0,15 \text{ m}^2/\text{s}$.

$$v_h = h \left(\frac{\overline{D_r}}{\rho_w} \right)^{\frac{1}{3}} + v_{h,back} \quad (4.30)$$

A su vez, las tensiones de fondo (τ_{bx}^E y τ_{by}^E) se aproximan mediante la velocidad euleriana (u^E y v^E). Los campos eulerianos se determinan mediante las velocidades lagrangianas y las velocidades de Stokes, calculables mediante la expresión de Phillips (1977).

TRANSPORTE DE SEDIMENTO

El transporte de sedimento se determina a partir de la resolución de una ecuación de advección-difusión, siguiendo el esquema de Galapatti (1983), partiendo del campo de velocidades eulerianas (u^E, v^E). Actualmente XBeach incluye dos formulaciones para la concentración de transporte de sedimento: la metodología de Soulsby (1997) y van Rijn (1998), y las más reciente de van Rijn (2007). Ambas pueden funcionar con dos tipos de forma de ola distinta en la región a modelar: teniendo en cuenta o no la asimetría y la oblicuidad del oleaje.

En las últimas versiones de XBeach, ha surgido esta forma de calcular la ecuación de advección-difusión acorde con la formulación de van Rijn (2007), indicada en la expresión 4.31:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hC u_{AV}}{\partial x} + \frac{\partial hC v_{AV}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right) = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} \quad (4.31)$$

Donde:

- D_h : coeficiente de difusión del sedimento, definido en la expresión 4.32.

$$D_h = \gamma_{visc} v_h \quad (4.32)$$

En la expresión 4.32 γ_{visc} es un factor de calibración, cuyo valor por defecto es 1,0 y v_h es la viscosidad horizontal, definida en la ecuación 4.30.

- C : concentración de sedimento promediada con el fondo.
- C_{eq} : concentración en equilibrio de van Rijn (2007), que incluye la turbulencia inducida por el oleaje en rotura (4.33):

$$C_{eq} = \frac{A_{sb}}{h} \left(\sqrt{(u^E)^2 + 0.64 u_{rms,2}^2} - u_{cr} \right)^{1.5} + \frac{A_{ss}}{h} \left(\sqrt{(u^E)^2 + 0.64 u_{rms,2}^2} - u_{cr} \right)^{2.4} (1 - \alpha_b) \quad (4.33)$$

Los coeficientes A_{ss} y A_{sb} (ecuaciones 4.34 y 4.35) son los coeficientes de transporte por suspensión y de fondo respectivamente, que dependen del diámetro medio del grano de sedimento presente en la playa D_{50} , de la densidad relativa entre el sedimento y el agua s (ρ_s/ρ_w) y del tamaño de partícula adimensional D_* .

$$A_{ss} = \frac{0.012 D_{50} \rho_s D_*^{-0.6}}{((s-1)g D_{50})^{1.2}} \quad (4.34)$$

$$A_{sb} = \frac{0.015 D_{50} \rho_s \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{1.2}}{((s-1)gD_{50})^{0.75}} \quad (4.35)$$

Por otro lado, α_b es el coeficiente de peso, que equivale a $\alpha = u^E / (u^E + u_{rms})$. A su vez también depende de $u_{rms,2}$, la velocidad orbital próxima al fondo, calculable a partir de la expresión de Reiners et al. (2004). El término u_{cr} es la velocidad crítica de transporte debido a corrientes y oleaje, definida en la ecuación 4.36.

$$u_{cr} = \alpha u_{cr,c} + (1 - \alpha) u_{cr,w} \quad (4.36)$$

Donde $u_{cr,c}$ es la velocidad crítica de flujos estacionarios basado en el criterio de Shields (1936), cuya expresión es $\theta_s = \tau_{0s} / gD(\rho_s - \rho)$. Como umbral de inicio de movimiento se usa el número crítico de Shields θ_{CR} , definido mediante la expresión de Soulsby y Whitehouse (1997).

Finalmente, $u_{cr,w}$ es la velocidad de flujo crítica para olas, basada en Komar y Miller (1975).

- u_{AV} y v_{AV} : velocidades de flujo relacionada con la no linealidad de la ola, representadas mediante las ecuaciones 4.37 y 4.38.

$$u_{AV} = V_w \cos(\theta_m) + u^E \quad (4.37)$$

$$v_{AV} = V_w \sin(\theta_m) + v^E \quad (4.38)$$

Donde θ_m es el ángulo medio del oleaje. Para calcular el término restante, la amplitud de velocidad V_w , se utiliza la ecuación 4.39.

$$V_w = \gamma_{ua} u_{rms} (S_k - A_s) \quad (4.39)$$

Siendo γ_{ua} un parámetro libre, y S_k y A_s las variables adimensionales de oblicuidad y asimetría respectivamente. Dichas variables son parametrizadas en función del número de Ursell (1953) U_r , el calado h , el número de onda k y la altura de ola espectral H_{m0} , definidos en las expresiones 4.40, 4.41 y 4.42.

$$S_k = \frac{0.79}{1 + \exp\left(\frac{-0.61 - \log U_r}{-0.35}\right)} \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{0.64}{U_r^{0.66}}\right)\right) \quad (4.40)$$

$$A_s = \frac{0.79}{1 + \exp\left(\frac{-0.61 - \log U_r}{-0.35}\right)} \sin\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{0.64}{U_r^{0.66}}\right)\right) \quad (4.41)$$

$$U_r = \frac{0.375 H_{m0} k}{(kh)^3} \quad (4.42)$$

Donde H_{m0} es la altura de ola significativa obtenida espectralmente.

- T_s : tiempo temporal de adaptación, definido como la escala de tiempo para la entrada de sedimento con la cual la concentración de sedimento se adapta gradualmente a las variaciones hidrodinámicas. Se calcula a través de la expresión 4.43:

$$T_s = \max\left(\frac{0.05h}{w_s}, T_{s,min}\right) \quad (4.43)$$

Siendo w_s la velocidad de caída de sedimento, h la profundidad local y $T_{s,min}$ un tiempo de adaptación mínimo definido por el usuario (por defecto es igual a 1 s).

La acumulación o erosión de sedimento se determina mediante la no igualdad de la concentración de sedimento C y la concentración de equilibrio C_{eq} en un instante de tiempo.

MODULO MORFOLÓGICO

El módulo morfológico se encarga de actualizar el nivel del fondo marino y corregir el efecto de la pendiente del fondo. Las fórmulas de transporte de sedimento se basan en la asunción que el fondo marino es prácticamente plano, mientras que en las zonas cercanas a la costa la pendiente del fondo tiene una importancia considerable en el transporte de sedimento. Para ello, se utilizan la expresión 4.44.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{1-p} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (4.44)$$

Siendo z_b el nivel del fondo del mar, p la porosidad en el fondo y f_{mor} el valor de la aceleración morfológica, que en el caso de XBeach es recomendable sea un valor dentro del intervalo (1-10) (McCall et al., 2009). El resto de términos, q_x y q_y , son las tasas de transporte de sedimento. Se obtienen mediante las ecuaciones 4.45 y 4.46:

$$q_x(x, y, t) = hC u^E - D_h h \frac{\partial C}{\partial x} - f_{slope} |u^L| h \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad (4.45)$$

$$q_y(x, y, t) = hC v^E - D_h h \frac{\partial C}{\partial y} - f_{slope} |v^L| h \frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (4.46)$$

En las expresiones anteriores se encuentra el factor corrector de la pendiente f_{slope} , cuyo valor viene dado por el usuario.

Por otro lado, para simular el volumen de arena desplazado durante la tormenta, XBeach implementa un modelo de erosión de dunas por avalancha. Esto sucede cuando la pendiente del fondo excede una pendiente crítica m_{cr} definida por el usuario, tanto para la zona seca como para la zona húmeda. En este caso, habrá intercambio de sedimento con el fin de reducir la pendiente a la pendiente crítica (Roelvink et al., 2009). Los criterios definidos en las expresiones 4.47 y 4.48 son los que utiliza XBeach para la avalancha:

$$\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| < m_{cr} \quad (4.47)$$

$$\left| \frac{\partial z_b}{\partial y} \right| < m_{cr} \quad (4.48)$$

Y los cambios en el nivel del fondo en la sección transversal de la playa se calculan a partir de las expresiones 4.49 y 4.50.

$$\Delta z_b = \min \left(\left[\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| - m_{cr} \right] \Delta x, v_{av,max} \Delta t \right) \quad si \quad \frac{\partial z_b}{\partial x} > 0 \quad (4.49)$$

$$\Delta z_b = \min \left(- \left[\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| - m_{cr} \right] \Delta x, -v_{av,max} \Delta t \right) \quad si \quad \frac{\partial z_b}{\partial x} < 0 \quad (4.50)$$

Las expresiones anteriores son análogas para la avalancha en la dirección y . Por otro lado, la velocidad v_{av} está limitada por una constante igual 0,05 m/s y ha sido desarrollada por Thiel de Vries (2009).

4.1.5.1. ENTRADAS DEL MODELO

Al igual que el modelo SWAN, el modelo XBeach necesita información que permita definir la batimetría y la topografía en la malla de cálculo (capítulo 4.1.3.). Adicionalmente, XBeach necesita una malla extra que defina el espesor de la capa que se puede erosionar. De este modo se separan las zonas erosionables de las que no tienen sedimento, como puede ser el inicio del paseo marítimo o áreas urbanizadas. Además, XBeach también permite considerar las sobreelevaciones del nivel del mar resumidas en la Tabla 5.

Otro de los parámetros clave es el diámetro del sedimento de la playa de interés (Tabla 21). Consultando el *Llibre verd de la costa catalana* (CIIRC, 2010) se obtienen los siguientes valores, donde D_{50} es diámetro medio de la arena y D_{90} es el tamaño de partícula para el que un 90% de la distribución granulométrica es de un tamaño inferior.

Tabla 21. Diámetro de sedimento en la playa de Castelldefels. Fuente: *Llibre verd de la costa catalana* (CIIRC, 2010).

	D50 (μm)	D90 (μm)
Playa de Castelldefels	250	410

Finalmente, la duración de las diferentes tormentas consideradas es de 6 h. Este es un valor promedio consistente a partir de las observaciones que se han realizado en tormentas en aguas del mar Mediterráneo.

4.1.5.2. CONDICIONES DE CONTORNO

XBeach permite incluir dos opciones diferentes para definir las condiciones de contorno del oleaje incidente. Las más usada de las dos es la del tipo espectral, que describe una forma espectral que XBeach usa para generar una serie temporal de oleaje. El modelo reutilizará esta serie temporal hasta que se complete toda la duración de la simulación establecida. Tal y como se ha mencionado anteriormente, esta información espectral del oleaje es la que se obtiene con el modelo SWAN.

También se deben definir condiciones de contorno en los límites laterales (los que son perpendiculares a la costa). Por lo general, estos son artificiales, porque el dominio del modelo es limitado y la costa física continua. En estos límites es necesario prescribir información sobre el área más allá del dominio de la malla de cálculo de tal manera que la condición en dicha frontera no influya en los resultados de manera adversa. Una de las condiciones que se pueden implementar son las condiciones de contorno de Neumann, que establecen que no hay cambios locales en la elevación y velocidad de la superficie. Este método es el más recomendado y el que XBeach incorpora por defecto.

4.1.5.3. SALIDAS DEL MODELO

Los archivos de salida que genera XBeach se encuentran en formato “.dat”. Los más relevantes y los que se utilizan en este estudio son los siguientes:

- dims.dat: contiene las dimensiones del modelo XBeach implementado (número de intervalos de tiempo de los *outputs* y número de celdas en las direcciones x e y).
- xy.dat: contiene las coordenadas x e y de la malla computacional.
- zb.dat: contiene los valores del nivel del fondo marino. Este archivo se utiliza para comprobar que la batimetría resultante sea coherente en comparación con la inicial y para dibujar los perfiles transversales finales de la playa.
- hh.dat: contiene los valores de la profundidad del agua (calado). Este archivo se utiliza para representar las zonas inundadas de la playa.

- sedero.dat: contiene los datos de erosión/acumulación. Este archivo se utiliza para representar la erosión y la acumulación.

4.1.5.4. POSTPROCESO

Al igual que el modelo SWAN, XBeach no tiene un visor de los resultados que genera. Por tanto, también se utiliza Matlab para la representación de dichos resultados, así como para su tratamiento y procesado.

4.1.5.5. ESQUEMA DEL MODELO

La Figura 63 muestra la secuencia en la que se ejecutan los diferentes componentes de XBeach descritos anteriormente. El esquema se ejecuta en bucle continuamente hasta que el tiempo del modelo excede el tiempo de finalización especificado.

4.1.6 ESQUEMA DEL ESTUDIO

En este caso, la resolución del estudio del comportamiento morfodinámico de la playa de Castelldefels antes y después de la extracción de arena se basa en los siguientes pasos:

1. Definir las condiciones de oleaje en aguas profundas para diferentes períodos de retorno.
2. Definir la sobreelevación del incremento del nivel del mar.
3. Propagar las condiciones de oleaje definidas anteriormente desde aguas profundas a aguas someras mediante el modelo SWAN.
4. Analizar el comportamiento de la playa bajo las condiciones de oleaje propagadas y los diferentes escenarios de sobreelevación del nivel del mar, con el fin de analizar la respuesta de la playa en su estado actual a partir del modelo XBeach.
5. Definir y aplicar los diferentes tipos de extracción de arena en el Tramo 1 de la playa de Castelldefels.
6. Aplicar de nuevo con el modelo XBeach todas las posibles combinaciones de oleaje y sobreelevación del nivel del mar, ahora con el objetivo de estudiar la respuesta de la playa una vez ejecutada la actuación.

La Figura 64 resume el proceso descrito anteriormente.

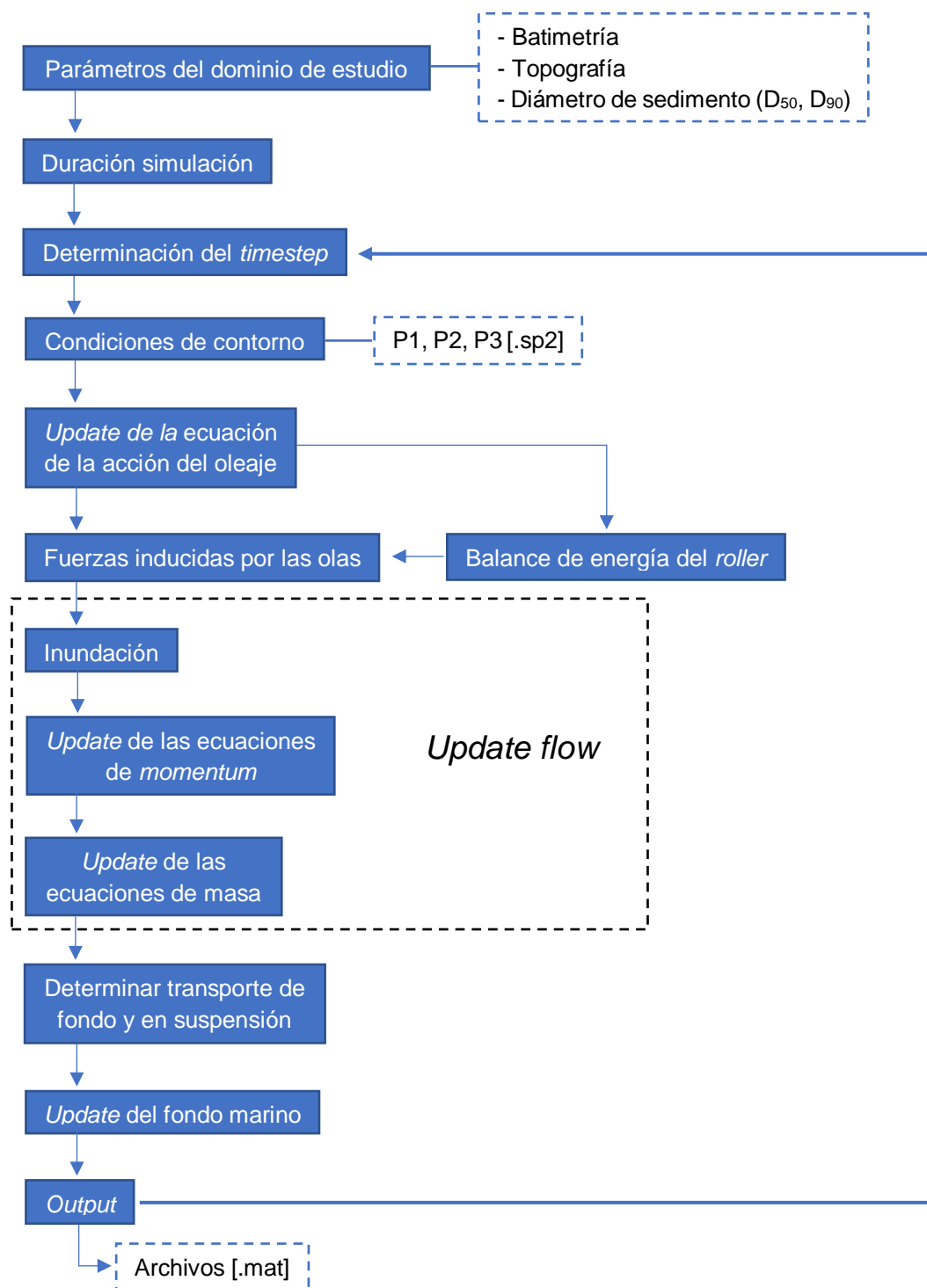


Figura 63. Representación global de XBeach. Fuente: Smit et al., 2010.

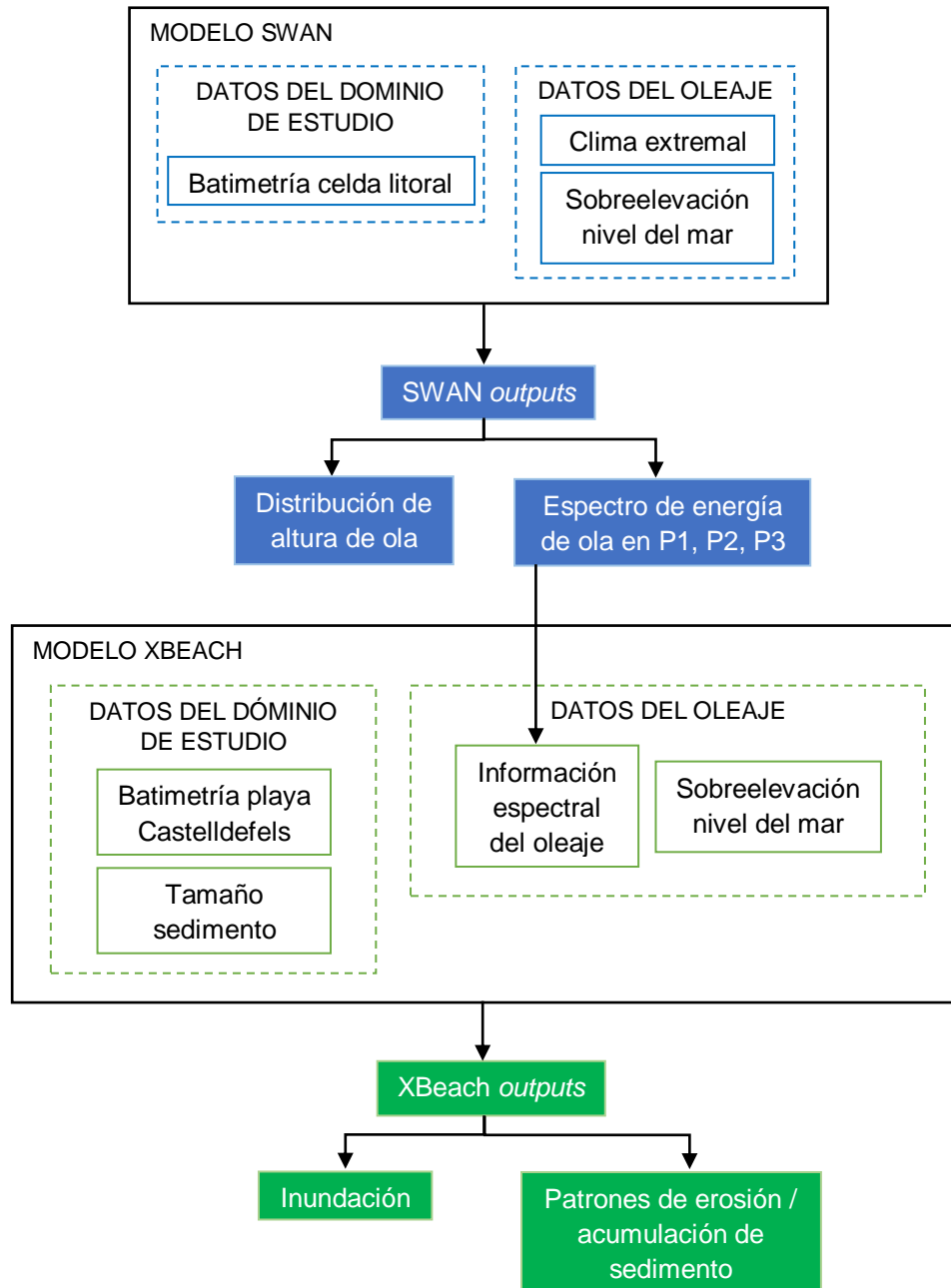


Figura 64. Diagrama de la metodología propuesta para estudiar la respuesta morfológica del Tramo 1 de la playa de Castldefels, la cual se basa en los modelos SWAN y XBeach.

4.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS HIDRODINÁMICO

En el presente capítulo se representan los resultados obtenidos en el análisis hidrodinámico realizado con el modelo SWAN. Las figuras que aparecen a continuación muestran, para cada escenario considerado, los resultados a escala de celda litoral y a escala local del lugar de extracción de sedimento, tal y como se muestra en la Figura 65.



Figura 65. Representación de los resultados del análisis hidrodinámico.

En la Figura 66 se muestra la distribución de la altura de ola significativa a lo largo de la celda litoral para todas las direcciones de procedencia de oleaje consideradas, con período de retorno igual a 25 años y sobreelevación del nivel medio del mar de 0,88 m. Los resultados obtenidos considerando el resto de las condiciones impuestas en la playa (direcciones de procedencia con períodos de retorno de 1 y 5 años y sobreelevaciones del nivel del mar iguales a 0 m y 0,40 m) pueden encontrarse en el Anexo 2. Además, en cada una de las figuras se incluyen las isobatas, que sirven como una herramienta que ayuda a una mejor comprensión de la evolución del oleaje a medida que éste se aproxima a la costa.

NOTA: En las figuras que se muestran en el Anexo 2 se puede observar que, cuando no se considera sobreelevación del nivel del mar, la línea de orilla que aparece en la ortofoto obtenida en el ICC y la isobata de 0 m que viene dada por la malla que contiene los datos de la batimetría prácticamente coinciden a lo largo de todo el tramo de la playa de interés. Aun así, existen algunas zonas de la playa donde se puede ver una franja de color negro entre las dos líneas de orilla exenta de resultados. Esto es debido al error existente a la hora de definir una línea de orilla a partir de la digitalización de cartas náuticas y datos cartográficos. Por consiguiente, se ha consultado el valor de la batimetría en estas zonas en concreto y se ha determinado que el error es del orden pocos centímetros. En consecuencia, se considera que la aproximación entre las dos líneas de orilla es satisfactoria. El principal objetivo de sobreponer ambas imágenes no es la de medir sobre la ortofoto los resultados obtenidos, sino el de identificar cuáles son las zonas potenciales de sufrir un impacto más grave para posteriormente tenerlas en cuenta en las políticas de seguridad frente a temporales.

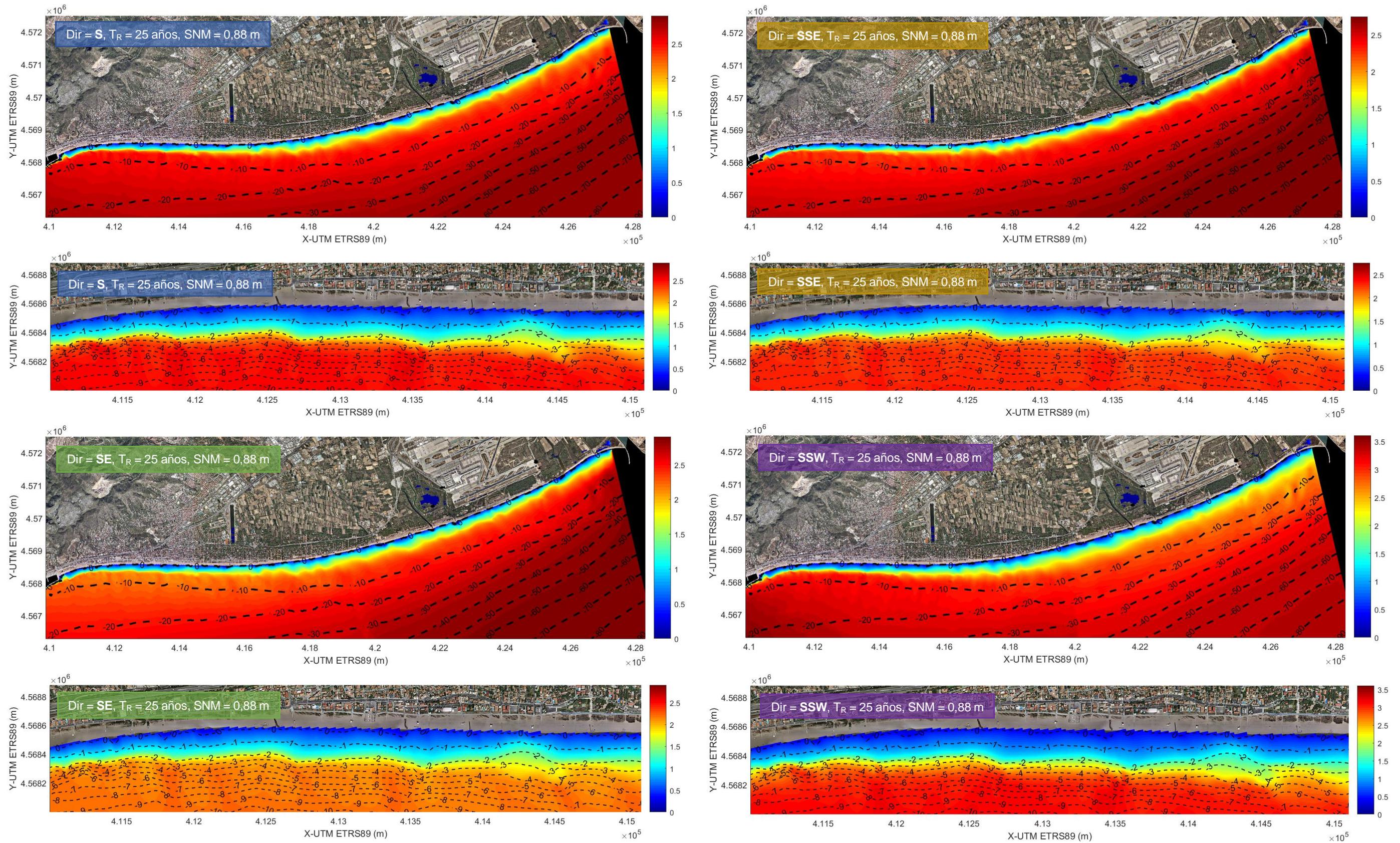


Figura 66. Distribución de la altura de ola significativa (m) en toda la celda litoral Port Ginesta – Puerto de Barcelona (superior) y en el Tramo 1 de la playa de Castelldefels (inferior), considerando todas las direcciones de procedencia (Dir) del oleaje (S, SE, SSE, SSW), período de retorno (T_R) de 25 años y el escenario III de sobreelevación del nivel del mar (SNM).

4.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS MORFOLÓGICO

Una vez realizado el análisis hidrodinámico, el siguiente paso consiste en obtener los resultados de la respuesta morfológica del Tramo 1 de la playa de Castelldefels antes y después de realizar la extracción de arena. Los tres tipos de extracción de sedimento considerados han sido descritos previamente en el capítulo 4.1.2.

Las figuras que aparecen a continuación (Figuras 68 y 69) muestran, para cada dirección de procedencia del oleaje, período de retorno igual a 25 años y una sobreelevación del nivel del mar de 0,88 m, los resultados a escala local (Figura 65) en términos de inundación y erosión/acumulación de sedimento. Los resultados obtenidos considerando el resto de las condiciones impuestas en la playa (períodos de retorno de 1 y 5 años y sobreelevaciones del nivel del mar de 0 m y 0,40 m), pueden encontrarse en el Anexo 3. También se incluyen los perfiles de playa resultantes en las secciones representadas en la Figura 67 y las diferencias entre la erosión y la acumulación que se produce para cada uno de los métodos de extracción respecto la respuesta obtenida en las condiciones actuales (situación final menos situación inicial).

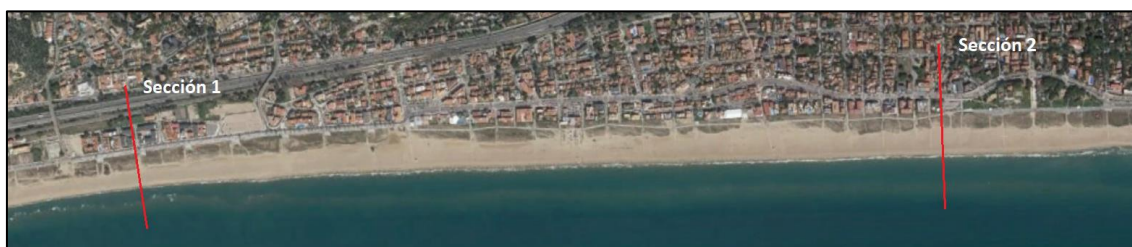


Figura 67. Ubicación de las secciones en las que se representan los perfiles de playa.

En las figuras que muestran la inundación, se dibujan las curvas de nivel de 0 m y 1 m con el objetivo de identificar la zona afectada por el agua. En cambio, en las figuras que muestran los patrones de acumulación y erosión se añaden todas las curvas de nivel hasta 1 m, para poder identificar donde se producen los procesos más importantes. Por otro lado, en los perfiles de playa se representan de color rojo las zonas de la playa que se encuentran bajo el agua del mar, tanto de la parte emergida como de la sumergida, y de color negro la superficie libre del mar y la playa seca.

NOTA: En las figuras que aparecen en el Anexo 3 se puede observar de nuevo que en algunas zonas en concreto las líneas de orilla de la ortofoto y la definida por la isobata de 0 m no acaban de coincidir. Este hecho no acaba de ser del todo relevante para analizar los resultados, pero sí para determinar las zonas de mayor afectación, tal y como se ha descrito en el capítulo 4.2.

4.3.1. SITUACIÓN ACTUAL

INUNDACIÓN

PATRON DE EROSIÓN / ACUMULACIÓN DE SEDIMENTO

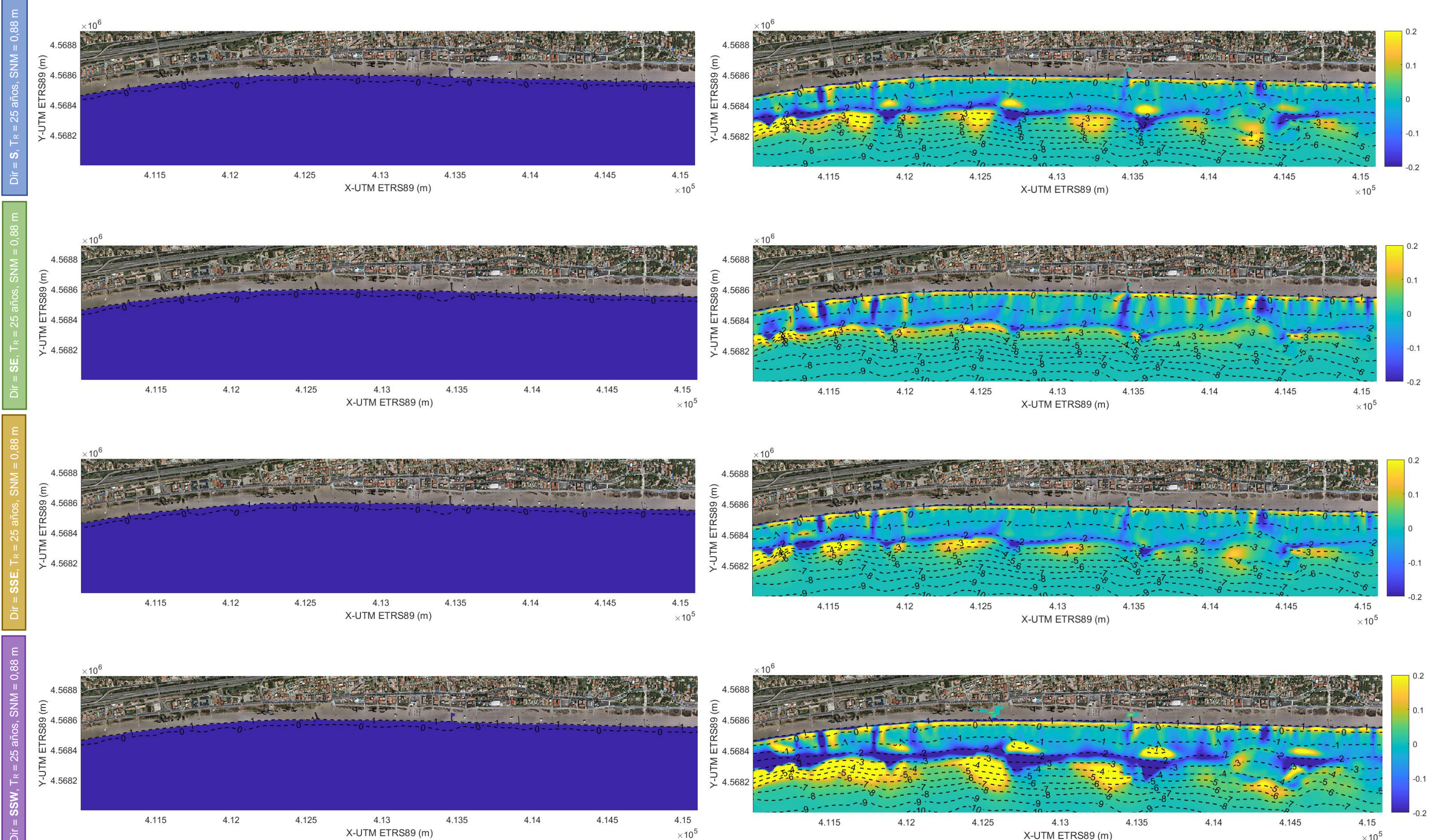


Figura 68. Las figuras muestran el área inundada (izquierda) y la variación espacial del fondo marino (derecha), en m, provocada por la erosión (valores negativos) y la acumulación (valores positivos) de sedimento al final de la simulación ($t=6h$) en las condiciones actuales del Tramo 1 de la playa de Castelfels para todas las direcciones de procedencia, período de retorno de 25 años y sobre elevación del nivel del mar igual a 0,88 m.

4.3.2. MÉTODO DE EXTRACCIÓN "A": ZANJA DE 40 cm

INUNDACIÓN

PATRÓN DE EROSIÓN / ACUMULACIÓN DE SEDIMENTO

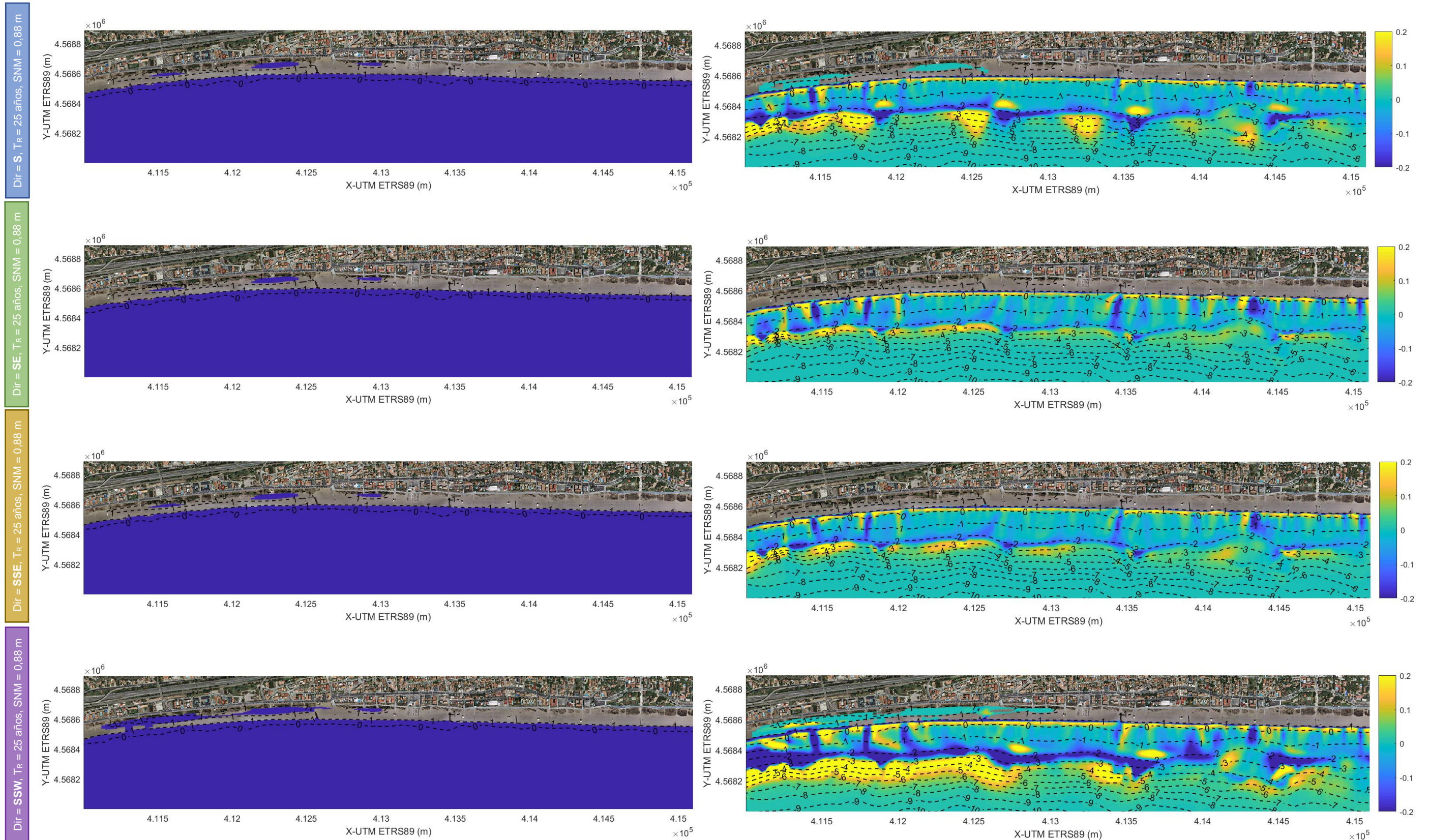
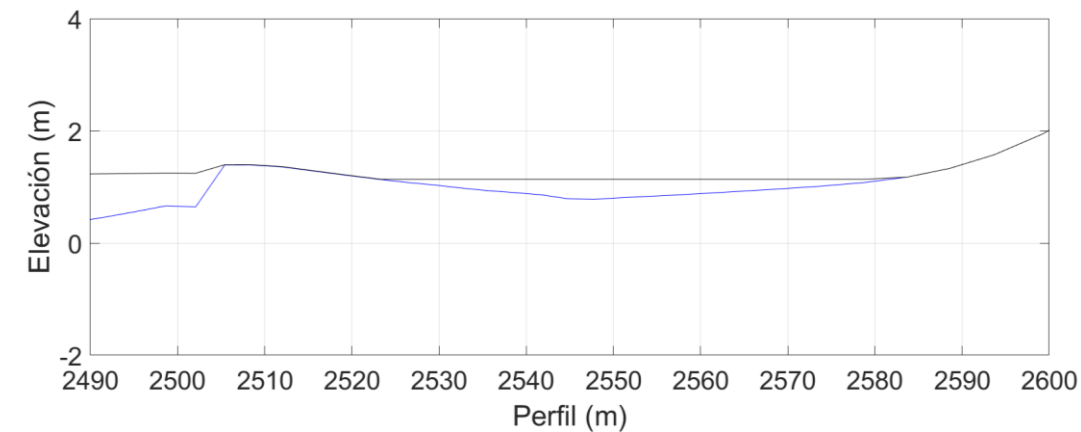
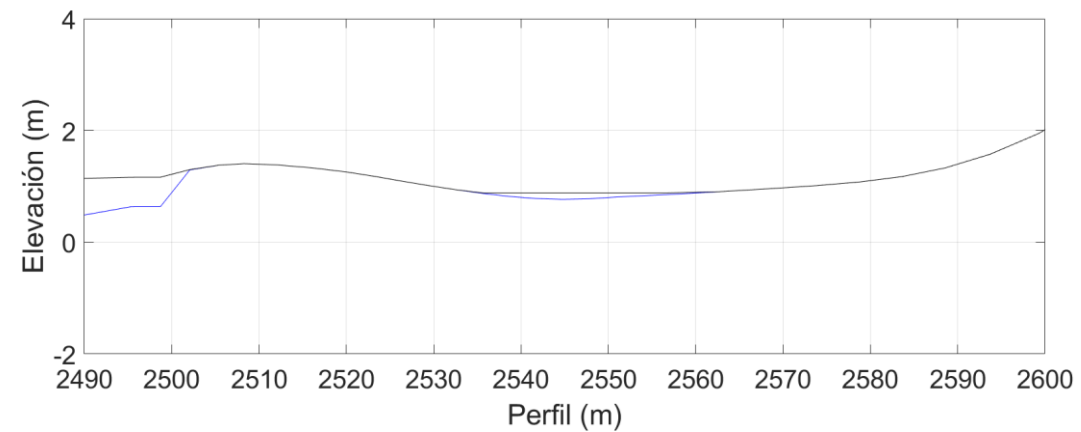
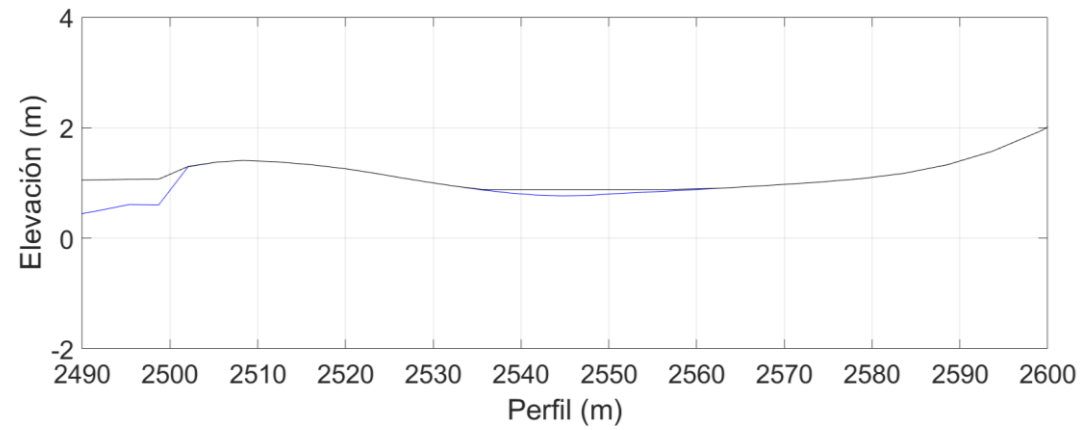
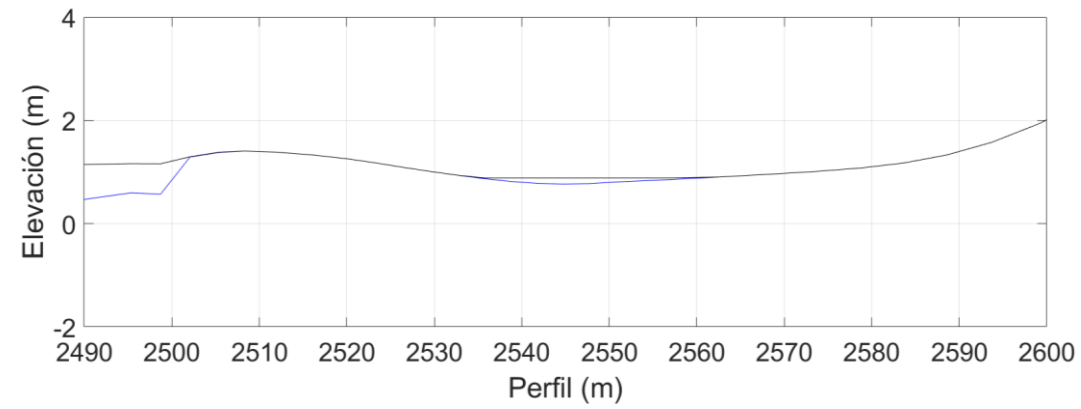


Figura 69. Las figuras muestran el área inundada (izquierda) y la variación espacial del fondo marino (derecha), en m, provocada por la erosión (valores negativos) y la acumulación (valores positivos) de sedimento al final de la simulación ($t=6h$) en las condiciones posteriores a la extracción de arena según el método "A", para todas las direcciones de procedencia, Períodos de retorno de 25 años y sobre elevación del nivel del mar igual a 0,88 m.

SECCIÓN 1



SECCIÓN 2

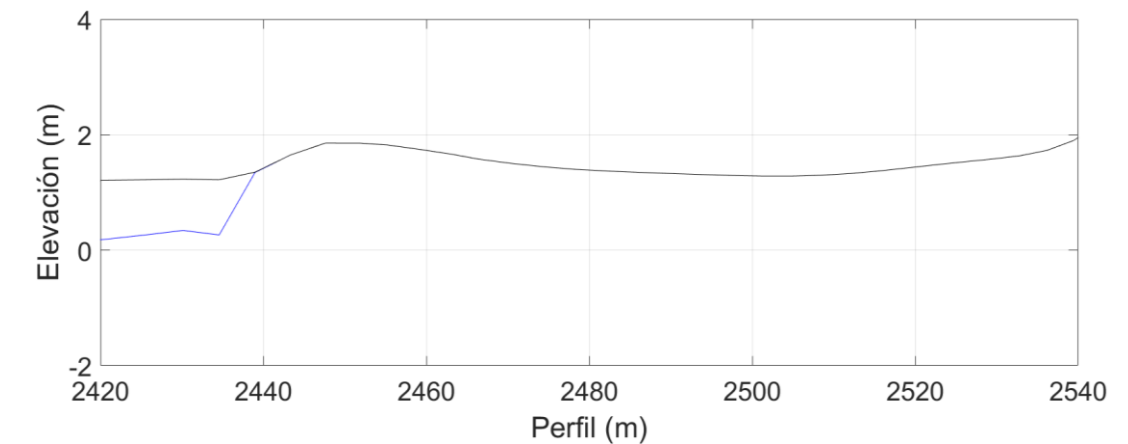
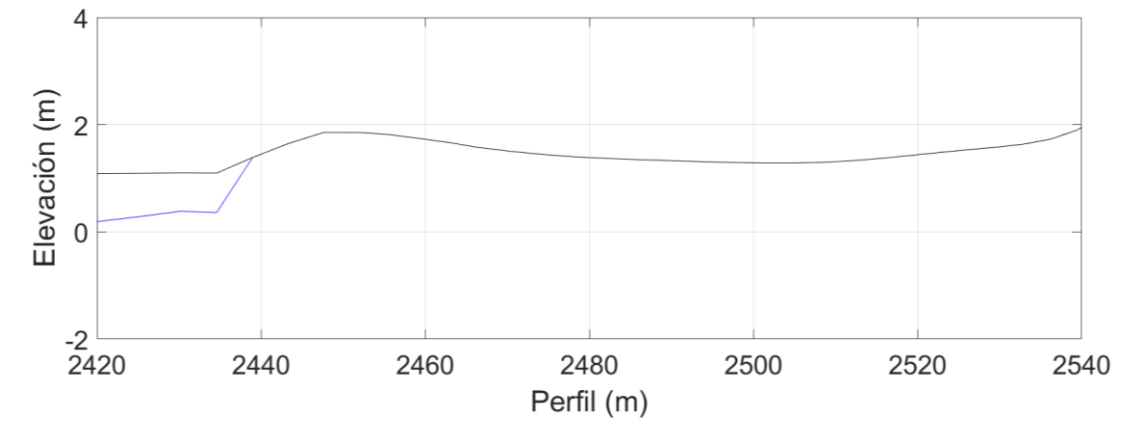
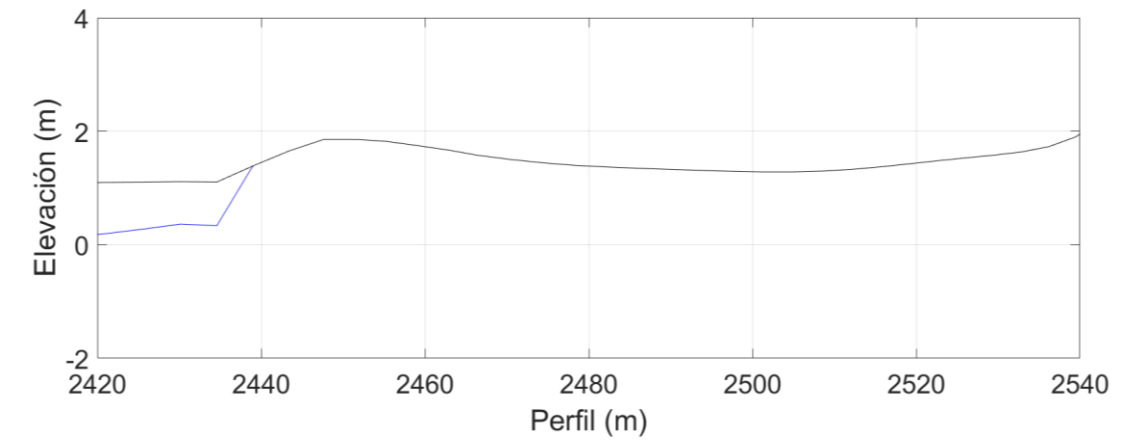
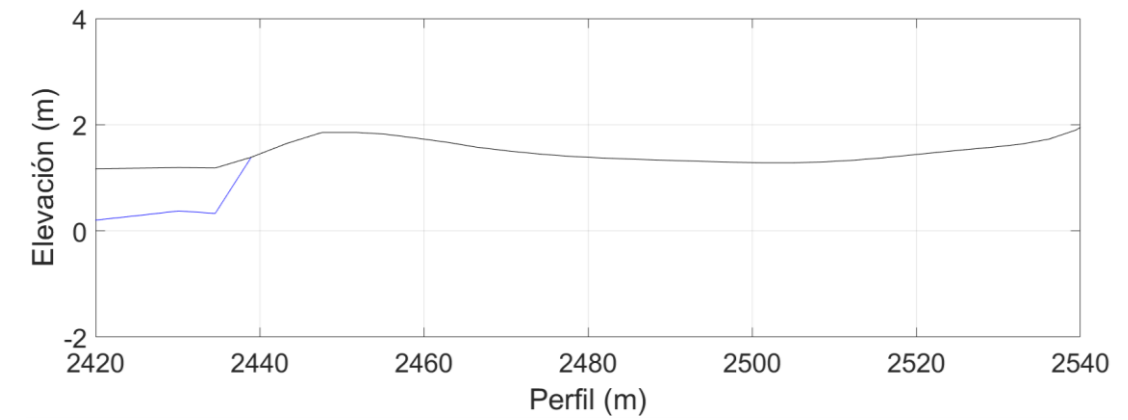


Figura 70. Perfiles de playa obtenidos en las Secciones 1 y 2 en las condiciones posteriores al método de extracción "A", para todas las direcciones de procedencia, períodos de retorno de 25 años y sobreelevación del nivel del mar igual a 0,88 m.

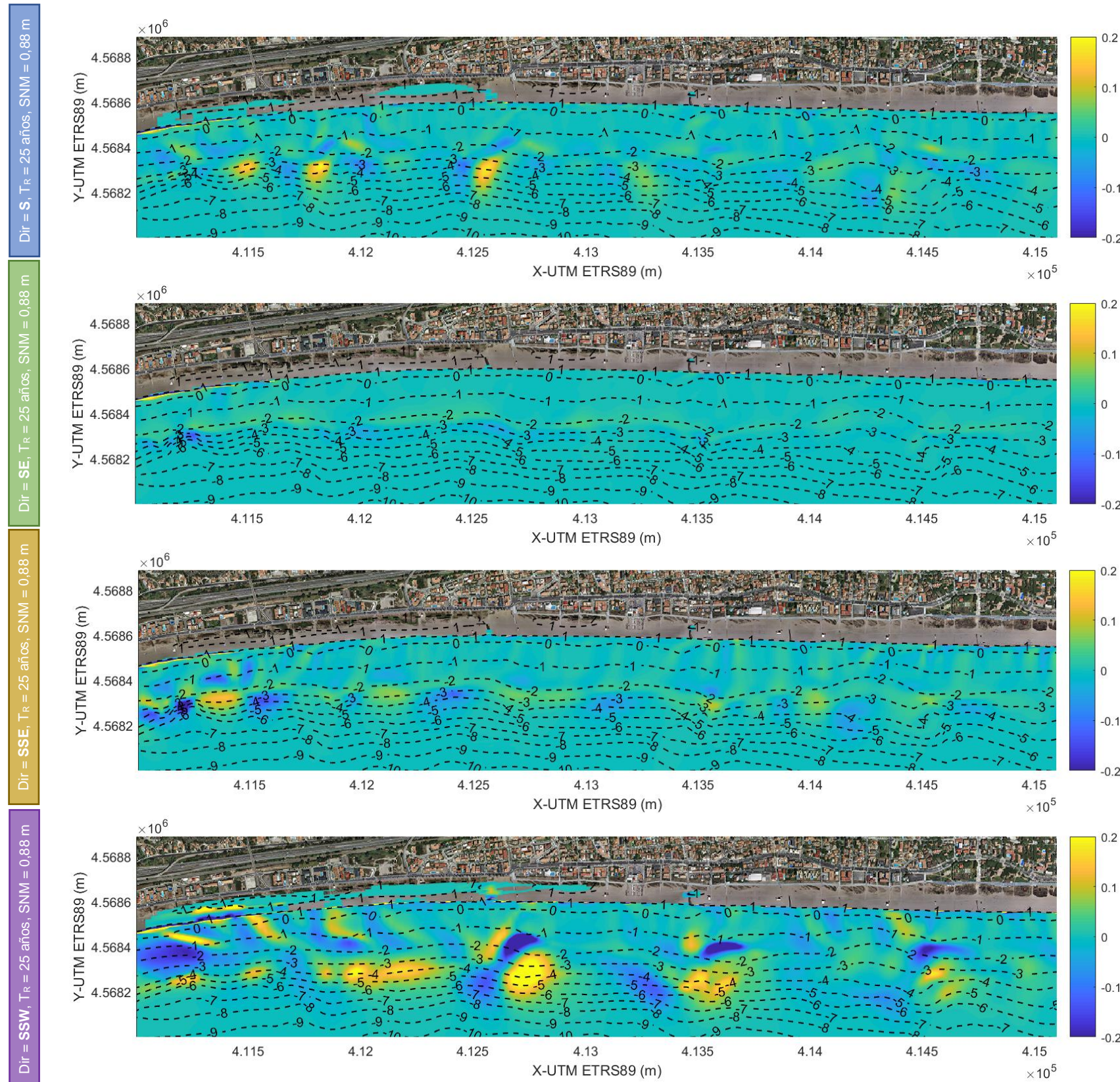
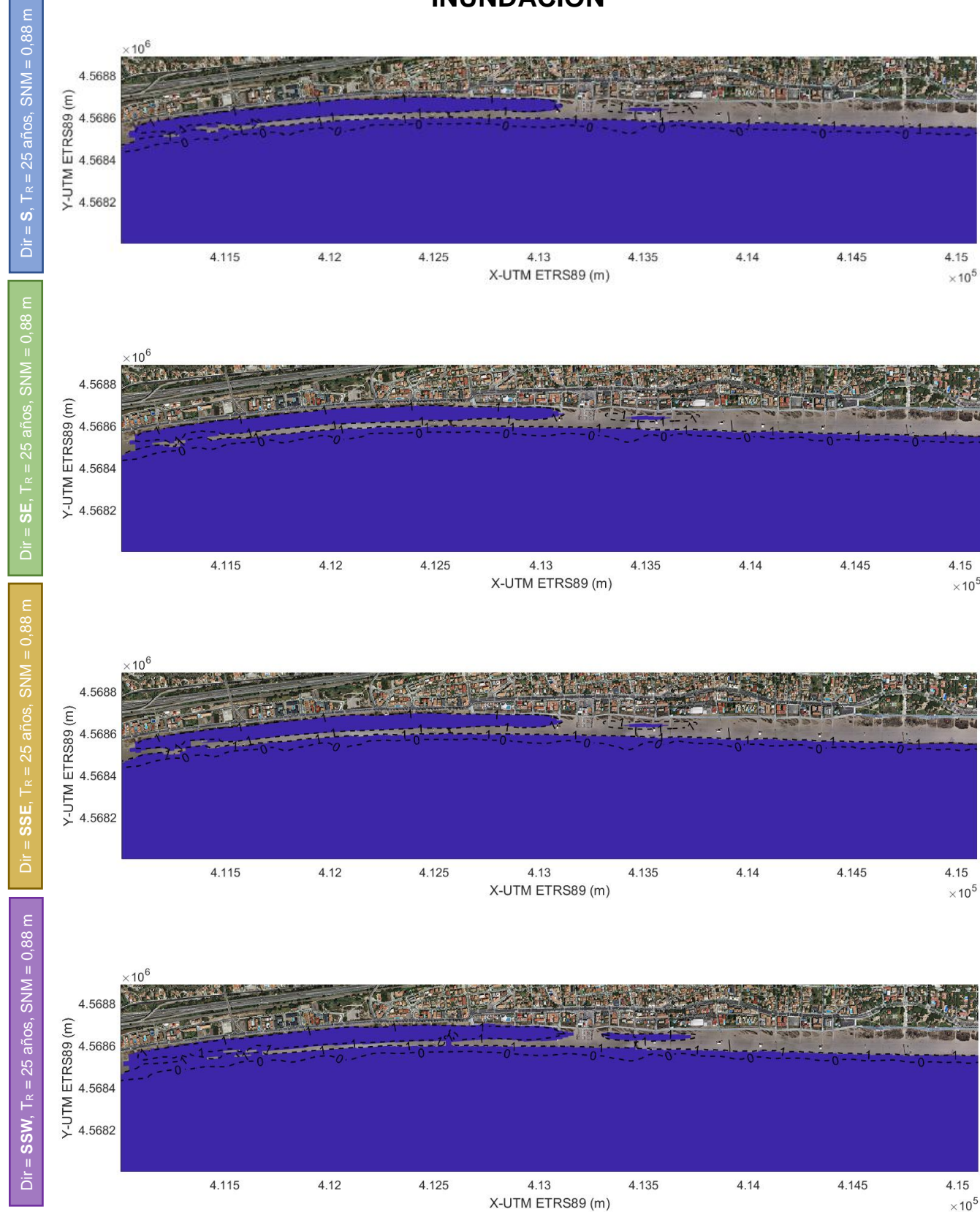


Figura 71. Diferencias en términos de erosión y acumulación cuando se compara la respuesta de la playa en las condiciones actuales y la respuesta obtenida en las condiciones posteriores al método de extracción "A", al final de la simulación ($t=6h$), para todas las direcciones de procedencia, con períodos de retorno de 25 años y sobreelevación del nivel del mar igual a 0,88 m.

4.3.3. MÉTODO DE EXTRACCIÓN "B": ZANJA DE 70 cm

INUNDACIÓN



PATRÓN DE EROSIÓN / ACUMULACIÓN

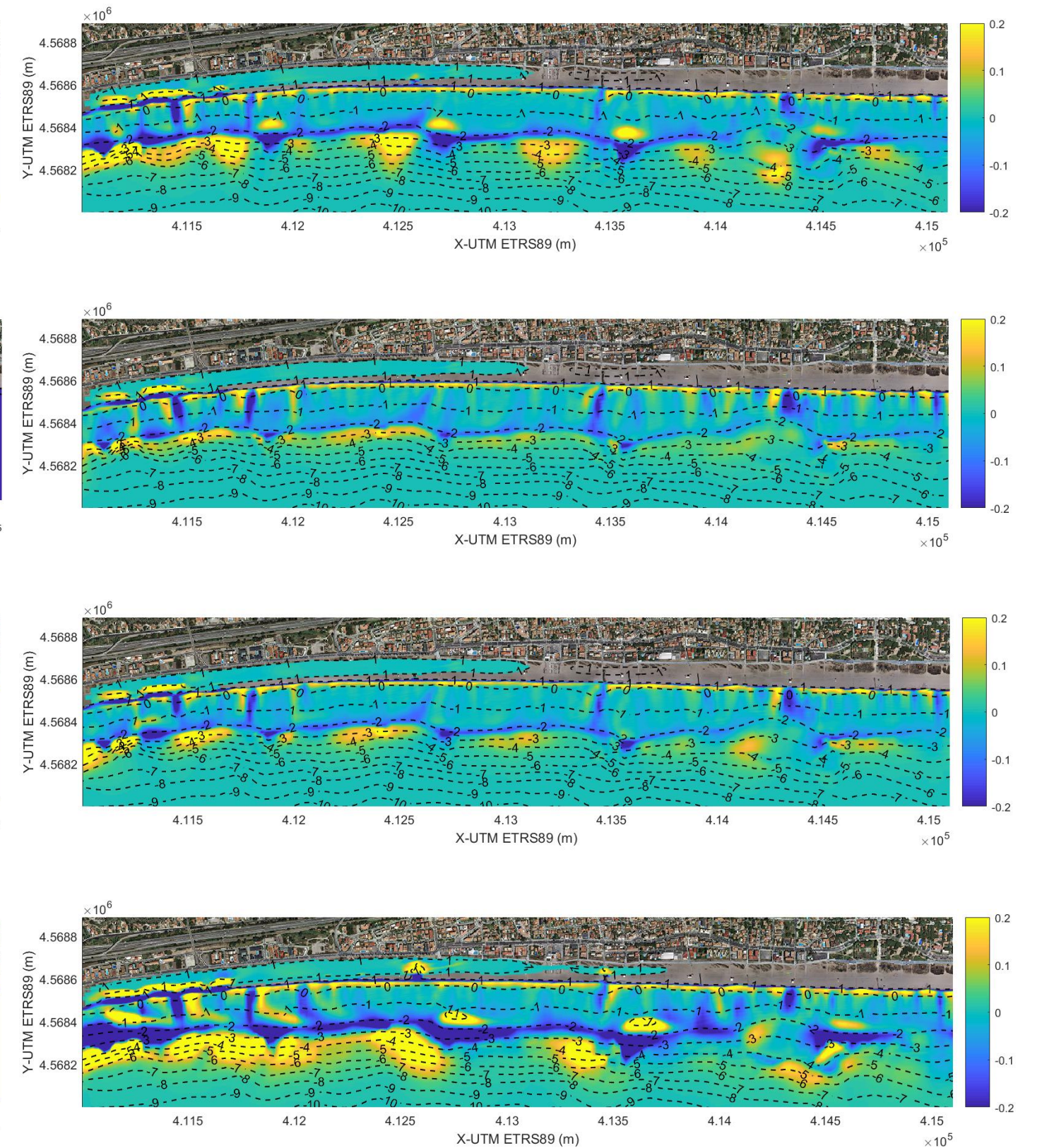
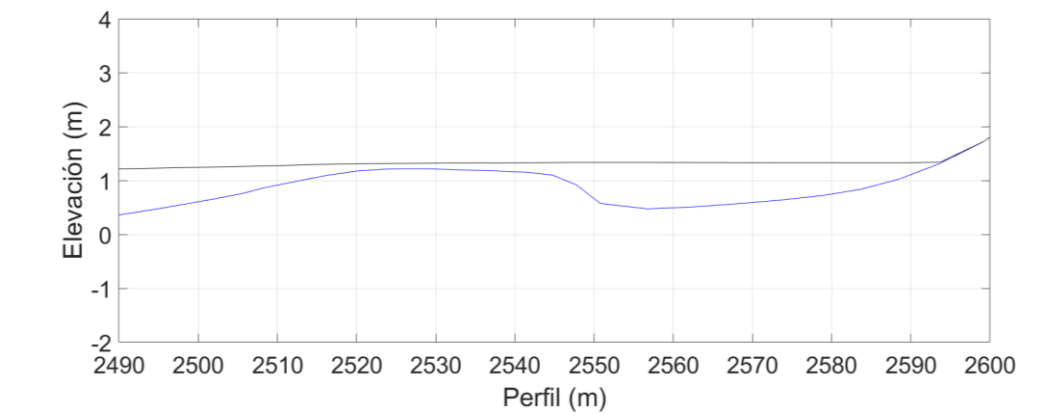
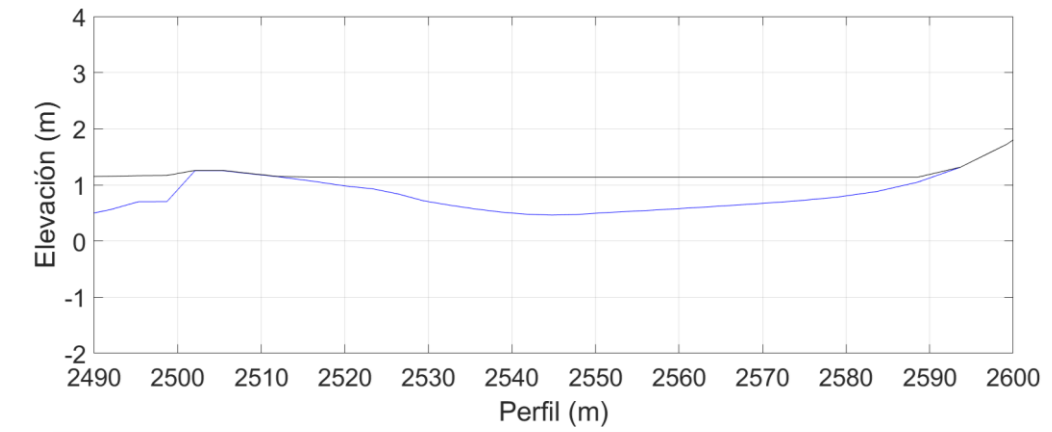
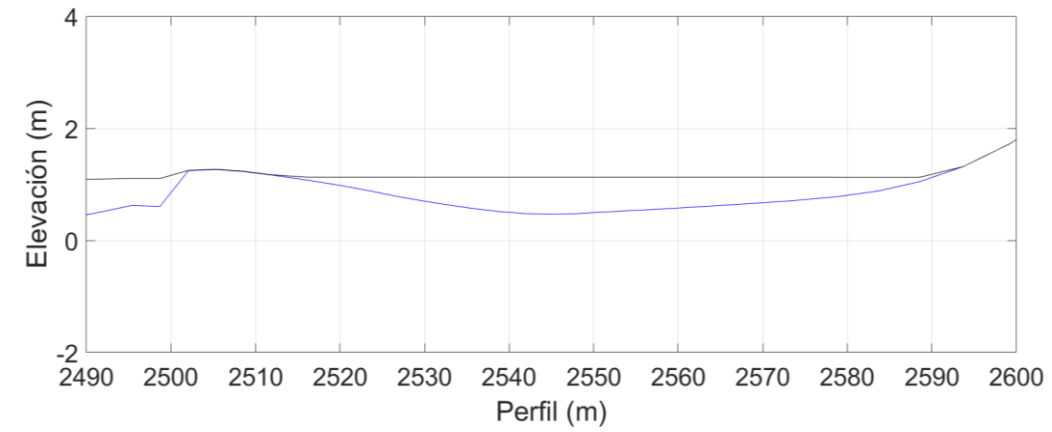
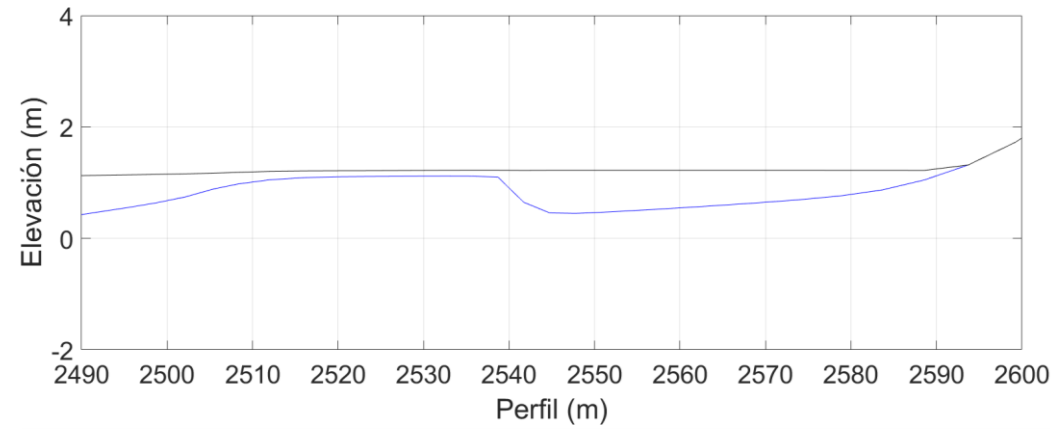


Figura 72. Las figuras muestran el área inundada (izquierda) y la variación espacial del fondo marino (derecha), en m, provocada por la erosión (valores negativos) y la acumulación (valores positivos) de sedimento al final de la simulación ($t=6h$) en las condiciones posteriores a la extracción de arena según el método "B", para todas las direcciones de procedencia, con períodos de retorno de 25 años y sobreelevación del nivel del mar igual a 0,88 m.

SECCIÓN 1



SECCIÓN 2

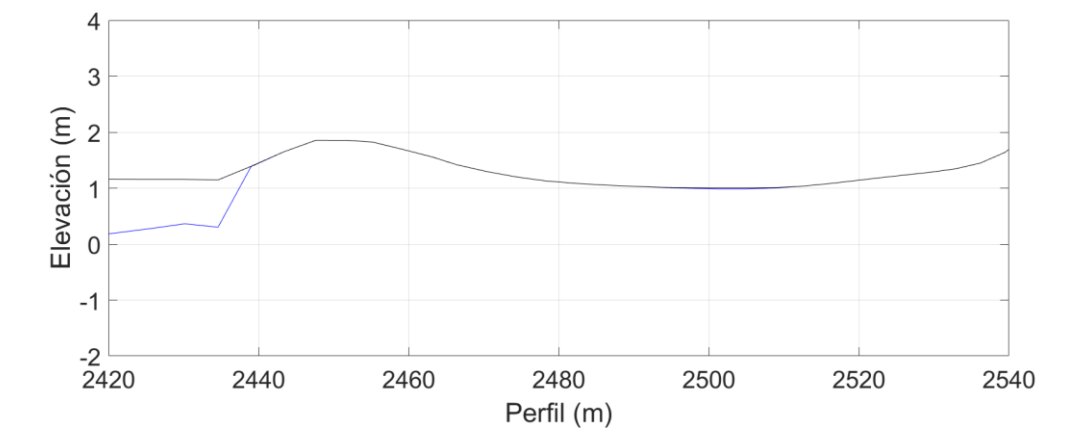
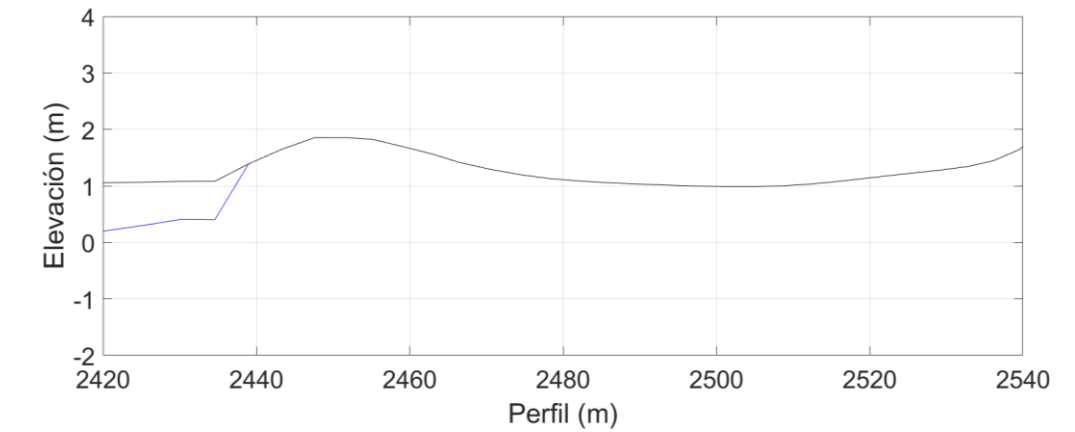
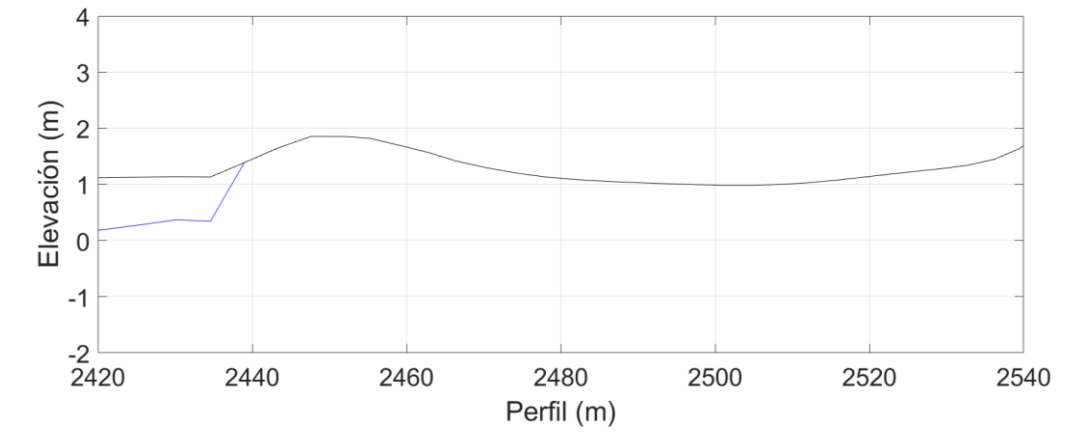
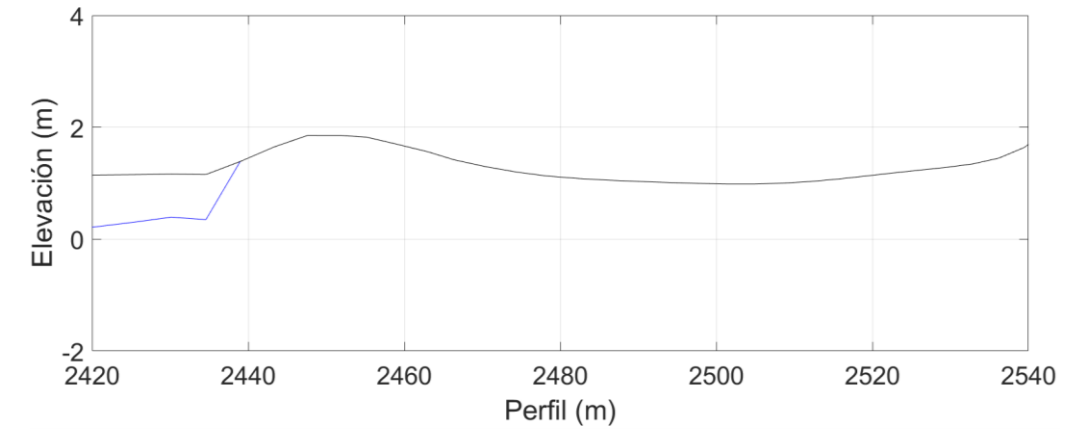


Figura 73. Perfiles de playa obtenidos en las Secciones 1 y 2 en las condiciones posteriores al método de extracción "B", para todas las direcciones de procedencia, períodos de retorno de 25 años y sobreelevación del nivel del mar igual a 0,88 m.

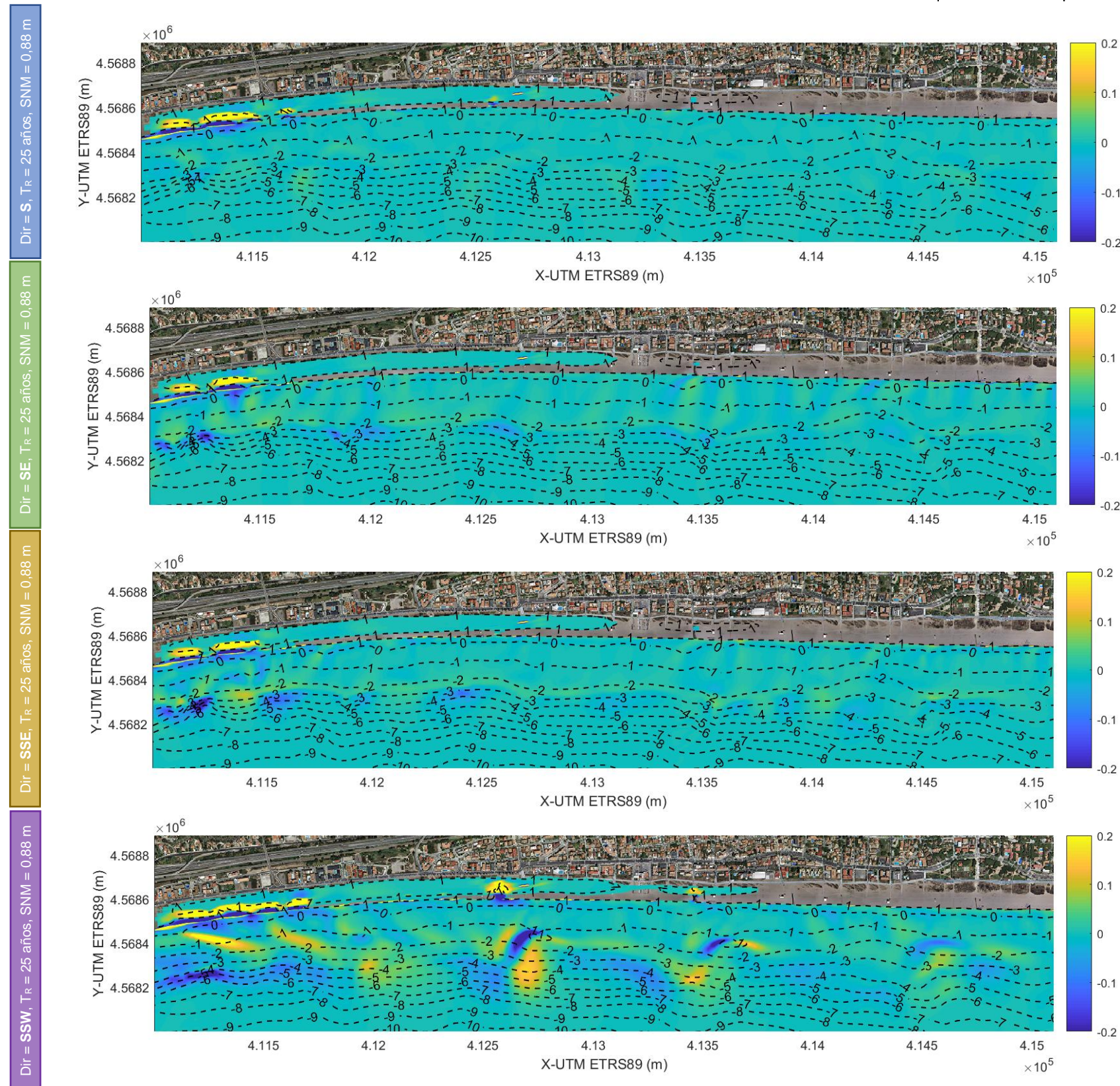


Figura 74. Diferencias en términos de erosión y acumulación cuando se compara la respuesta de la playa en las condiciones actuales y la respuesta obtenida en las condiciones posteriores al método de extracción "B", al final de la simulación ($t=6h$), para todas las direcciones de procedencia, con períodos de retorno de 25 años y sobreelevación del nivel del mar igual a 0,88 m.

4.3.4. MÉTODO DE EXTRACCIÓN "C": RETROCESO DE LA LÍNEA DE ORILLA

INUNDACIÓN

PATRÓN DE EROSIÓN / ACUMULACIÓN DE SEDIMENTO

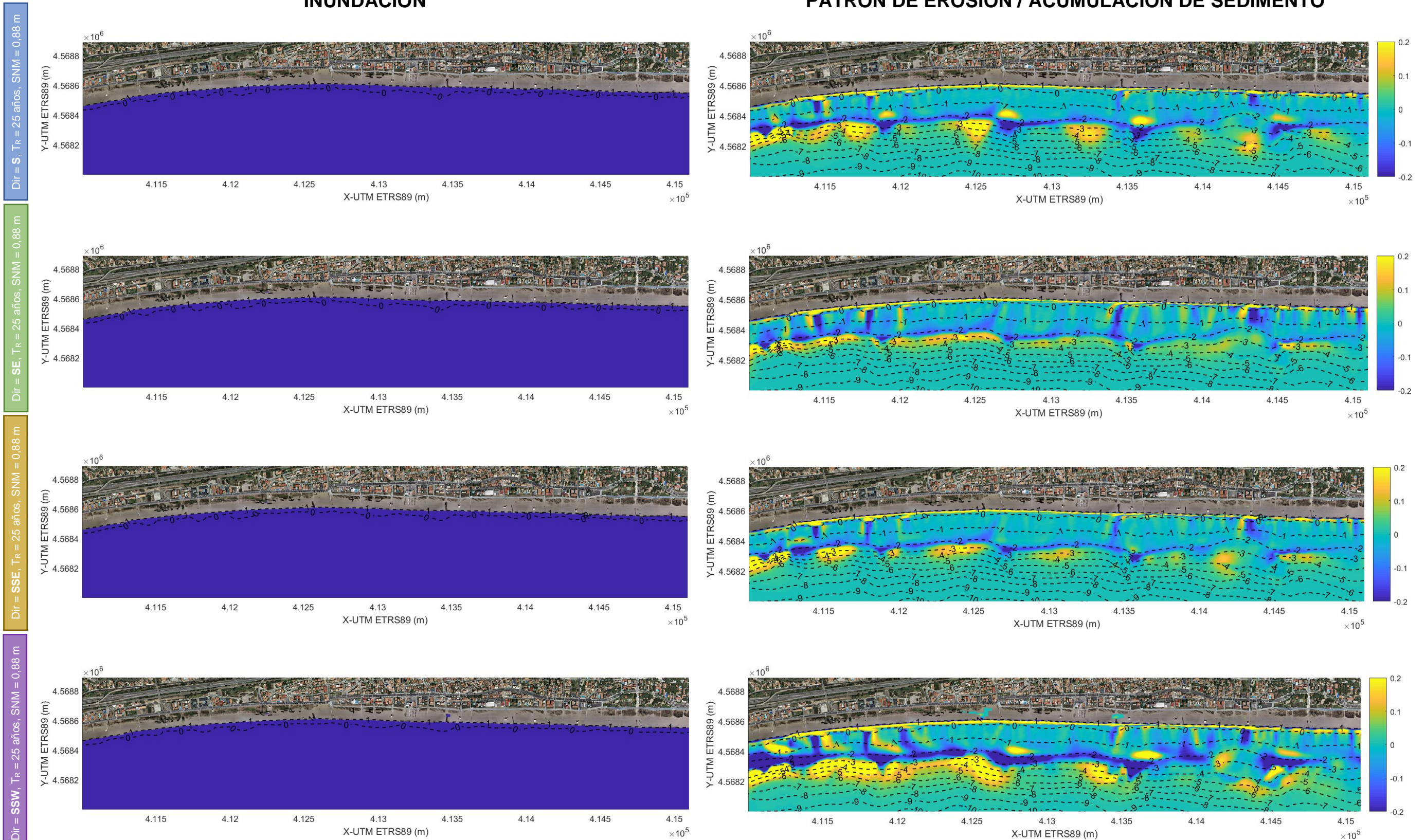
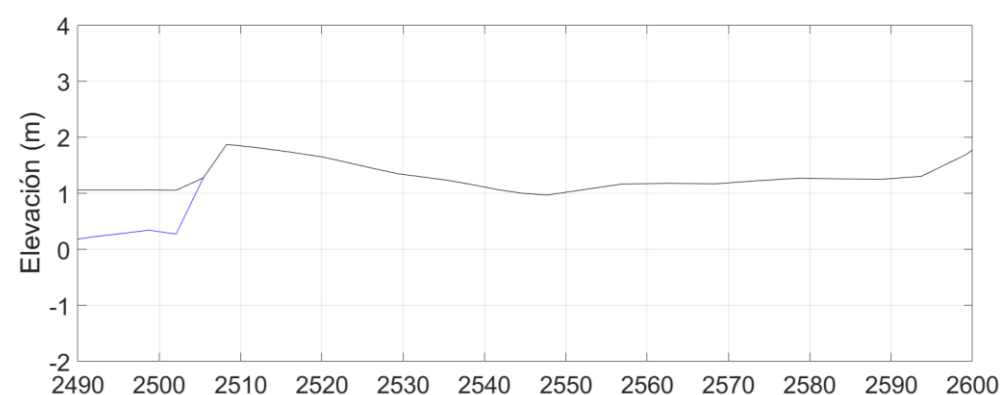
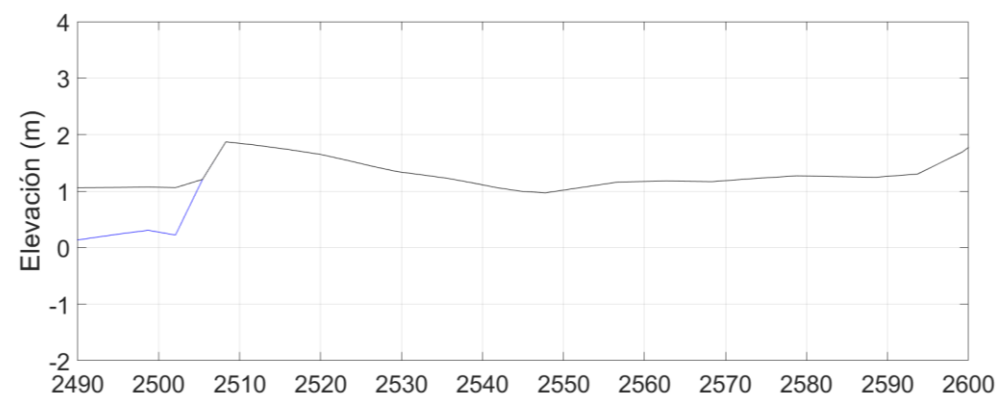


Figura 75. Las figuras muestran el área inundada (izquierda) y la variación espacial del fondo marino (derecha), en m, provocada por la erosión (valores negativos) y la acumulación (valores positivos) de sedimento al final de la simulación ($t=6h$) en las condiciones posteriores a la extracción de arena según el método "C", para todas las direcciones de procedencia, con períodos de retorno de 25 años y sobre elevación del nivel del mar igual a 0,88 m.

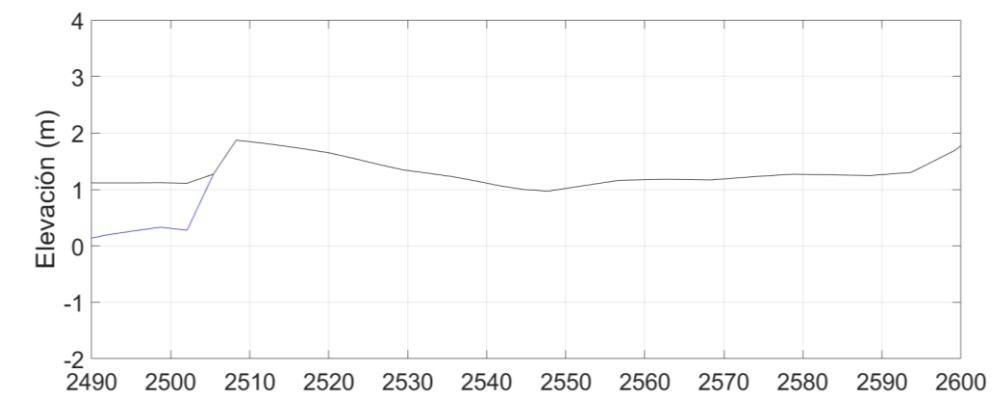
SECCIÓN 1



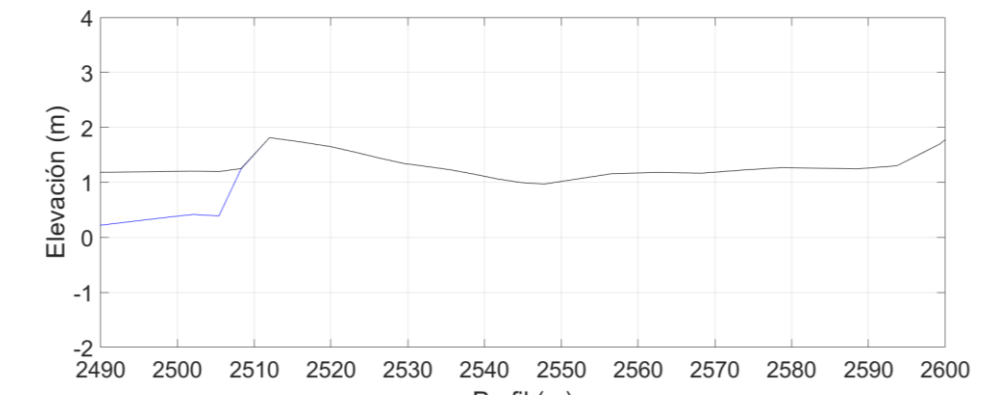
Perfil (m)



Perfil (m)

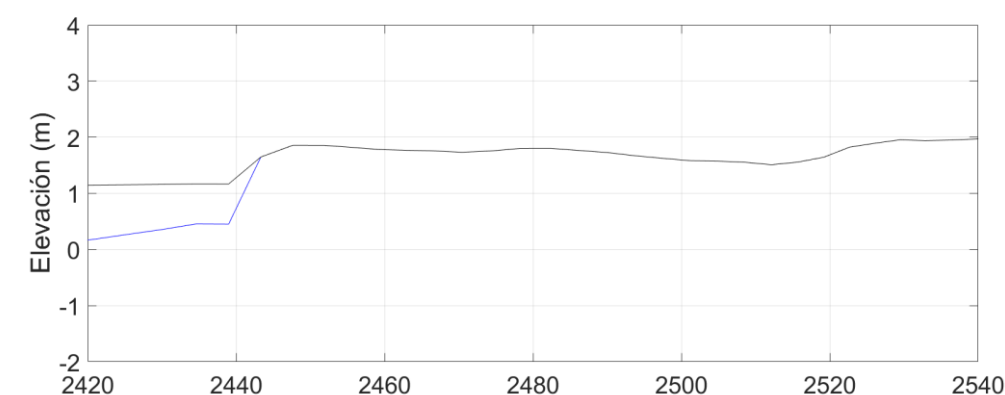


Perfil (m)

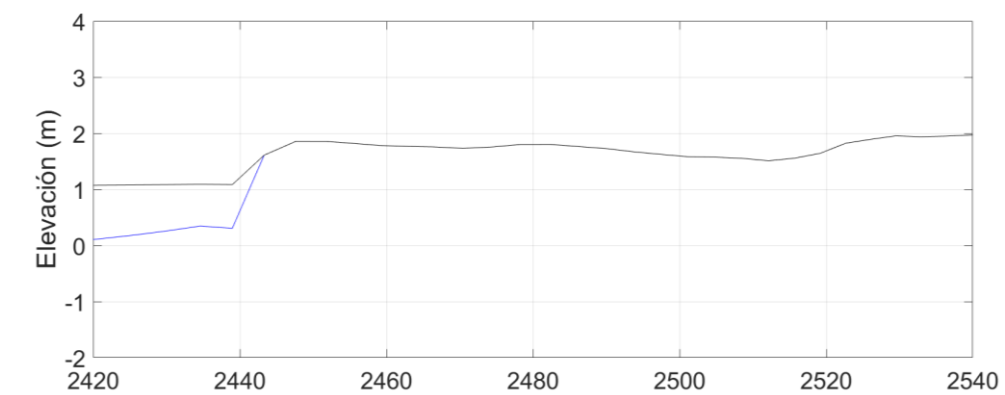


Perfil (m)

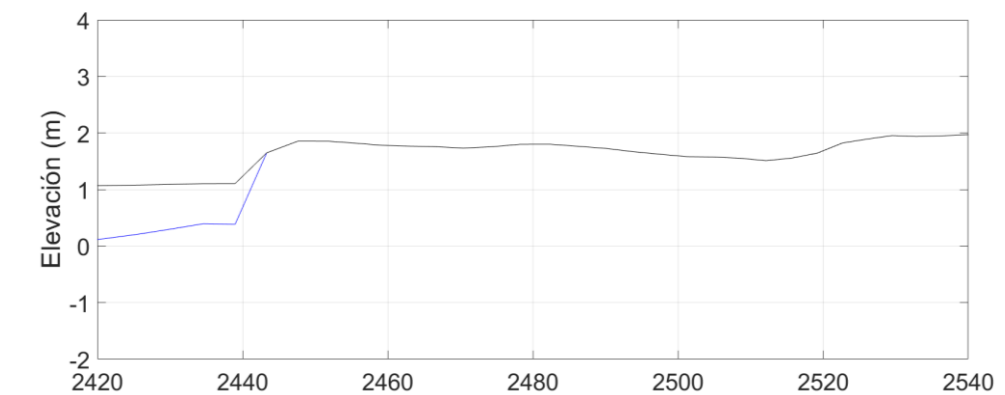
SECCIÓN 2



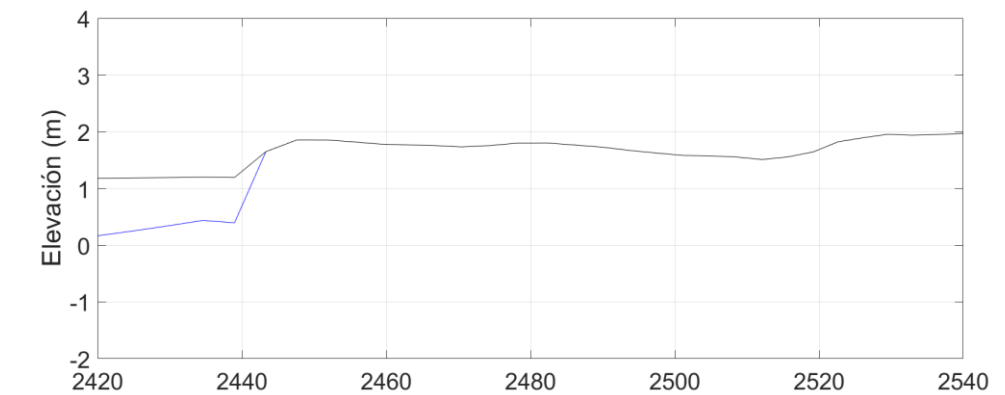
Perfil (m)



Perfil (m)



Perfil (m)



Perfil (m)

Figura 76. Perfiles de playa obtenidos en las Secciones 1 y 2 en las condiciones posteriores al método de extracción "C", para todas las direcciones de procedencia, períodos de retorno de 25 años y sobreelevación del nivel del mar igual a 0,88 m.

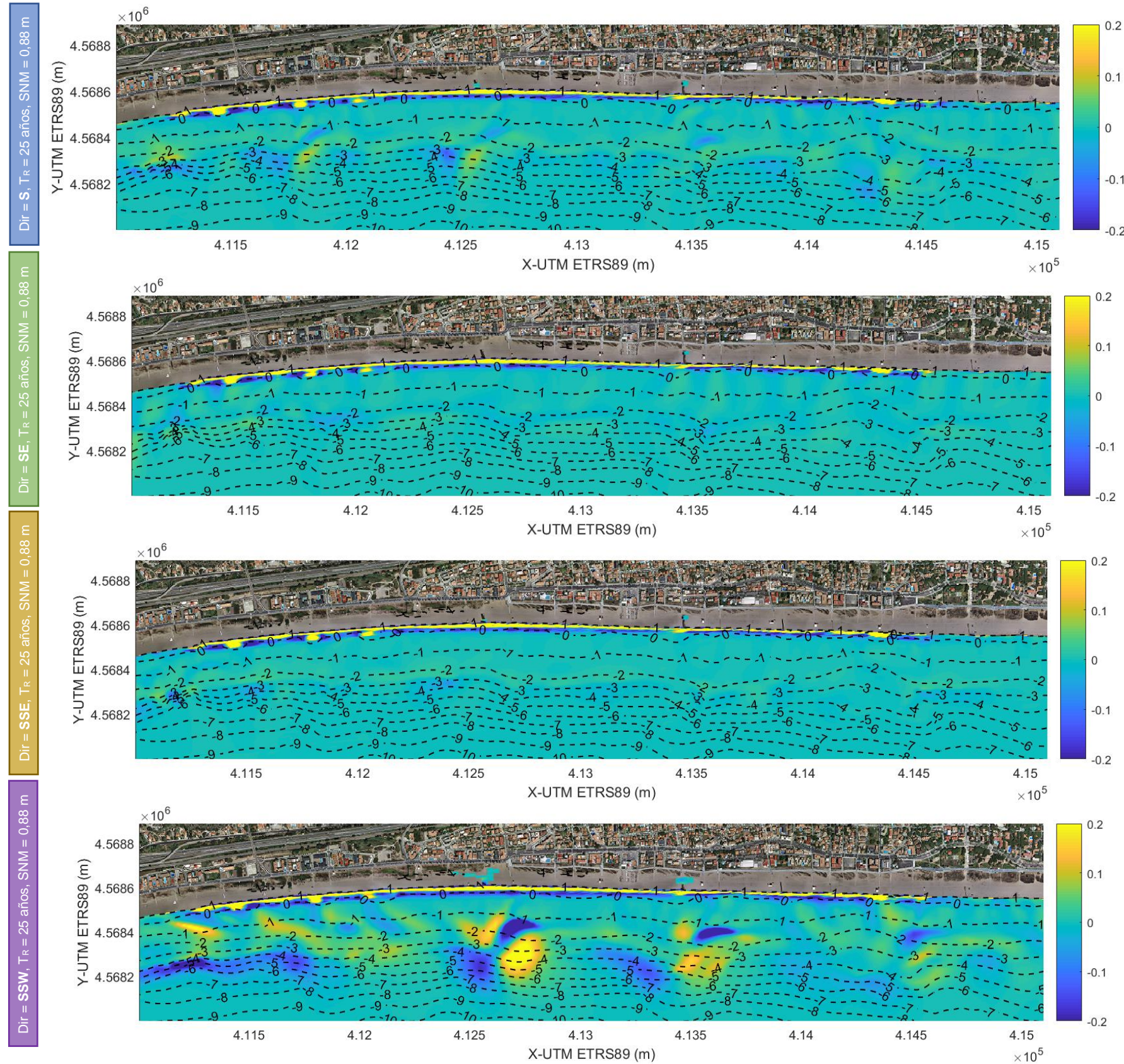


Figura 77. Diferencias en términos de erosión y acumulación cuando se compara la respuesta de la playa en las condiciones actuales y la respuesta obtenida en las condiciones posteriores al método de extracción "C", al final de la simulación ($t=6h$), para todas las direcciones de procedencia, con períodos de retorno de 25 años y sobreelevación del nivel del mar igual a 0,88 m.

4.4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.4.1. INTRODUCCIÓN

A continuación, se analizan los resultados presentados en los capítulos 4.2 y 4.3. La escala episódica considerada tiene una importancia considerable dado que los eventos extremos provocan los peores daños en las regiones costeras y en las zonas posteriores a las playas, especialmente cuando la planificación o la preparación para este tipo de eventos no ha sido la adecuada. Por esta razón, es necesario conocer el daño potencial presentado por eventos de esta naturaleza. Los conocimientos en probabilidad, en evaluación del impacto de tormentas en regiones costeras y del daño asociado a las mismas pueden servir como base para diseñar estrategias de protección y gestión de la costa. Además, definir las escalas de trabajo permite conocer por adelantado los daños en el área de estudio, permitiendo establecer prioridades en actuaciones que permitan adaptarse mejor a los cambios y minimizar el daño económico y social que provocan los temporales.

Un *input* de gran importancia en este estudio ha sido el modelo digital de elevaciones que define el perfil de la playa. La calidad, la precisión y la resolución de la información batimétrica y topográfica repercuten significativamente en el resultado final de la respuesta morfológica tras el paso de la tormenta considerada. En este caso, la información obtenida tiene una gran resolución, permitiendo así obtener unos resultados muy detallados.

NOTA: A la hora de analizar los resultados obtenidos, es importante destacar que el modelo XBeach es un modelo *inter-wave*, es decir, los resultados se obtienen integrando todo el tren de oleaje a través de unos parámetros representativos (como por ejemplo la altura de ola significativa H_s). De modo que, si bien el efecto local queda parcialmente reflejado, no se simula el comportamiento de cada ola individual por separado. Por tanto, no debe descartarse que alguna ola en concreto llegue a sobrepasar la zona en la que se produce la inundación.

4.4.2. ANÁLISIS HIDRODINÁMICO

En la Figura 66 se puede ver como el oleaje se propaga desde mar adentro hasta la línea de orilla de la celda litoral Port Ginesta – Puerto de Barcelona y del Tramo 1 de la playa de Castelldefels.

Las playas que configuran la celda litoral tienen una pendiente muy suave y muestran un comportamiento disipativo. En consecuencia, la disminución de la altura de ola se produce progresivamente. Tal y como era de esperar, en todos los casos considerados se observa el siguiente comportamiento: la altura de ola significativa se mantiene sin variaciones hasta llegar a una profundidad en la que comienza a manifestarse el *shoaling*, que juntamente con la fricción del fondo marino, disipan la energía de ola. A continuación, el oleaje va perdiendo altura hasta llegar a la zona de rompientes, lugar en el que disipa por completo su energía por rotura (*breaking*) y la ola se transforma en la lámina de agua que llega a la orilla. Los lugares en concreto donde aparece el *shoaling* por un lado, y la rotura por el otro, dependen del período de retorno de la tormenta en cuestión. Cuanto mayor sea el período de retorno asociado a la tormenta, la altura de ola será más grande y, por tanto, las olas comenzarán a notar antes los efectos del *shoaling* y del *breaking* ya que necesitarán más recorrido para disipar su energía.

En consecuencia, tomando como ejemplo una tormenta procedente del Sur y con período de retorno igual a 1 año ($H_s=1,07$ m), el *shoaling* aparece cuando el oleaje alcanza una profundidad de 20 m y el *breaking* cuando alcanza los 2 m de profundidad. En cambio, el oleaje asociado con una tormenta de período de retorno igual a 5 años ($H_s=2,30$ m), el primero de los procesos aparece a partir de los 30 m de profundidad y el segundo al llegar a los 3 m de profundidad.

Finalmente, la tormenta asociada a 25 años de período de retorno ($H_s=2,89$ m), comienza a disminuir su altura de ola a partir de los 40 m de profundidad y rompe cuando alcanza los 4 m de profundidad.

La dirección de procedencia del oleaje también es un factor relevante en el *shoaling* y el *breaking*. Tormentas procedentes del Sur y del Sureste presentan los mismos valores de altura de ola y período de retorno, pero se observa que las olas comienzan a disipar energía a profundidades más elevadas en tormentas procedentes del Sureste. Ello es debido a que el oleaje del Sureste tiene una incidencia más oblicua, por lo que se refracta más, perdiendo parte de su energía durante el proceso de refracción. Por el contrario, el oleaje del Sur es prácticamente perpendicular a la playa, con lo cual no se refracta. En consecuencia, a pesar de que las tormentas difieren únicamente en su dirección de procedencia, el oleaje llega a la playa con una menor intensidad en tormentas procedentes del Sureste.

En el caso de tormentas procedentes del Sur-Sureste con un período de retorno igual a 1 año, se puede ver que presentan un comportamiento un poco diferente al resto. El oleaje no disipa energía en ningún momento y mantiene su altura de ola constante hasta llegar a la zona de rompientes, situada entre los 2 m y 1 m de profundidad. Esto es debido a que la altura de ola de esta tormenta es muy pequeña ($H_s=1,02$), al igual que la energía asociada. En cambio, cuando se consideran tormentas con un período de retorno mayor, se observa como el *shoaling* vuelve a aparecer, en este caso a partir de los 30 y 50 m de profundidad.

También se observan gradientes de altura de ola en el sentido longitudinal a la línea de orilla, sobre todo entre los 12 m y 4 m de profundidad (Figura 78). Esto es debido a que la batimetría está definida con un gran nivel de detalle y las isobatas no son siempre estrictamente paralelas a la línea de orilla. Su recorrido es ondulado dado que los datos utilizados permiten obtener una descripción precisa de la realidad del fondo marino.

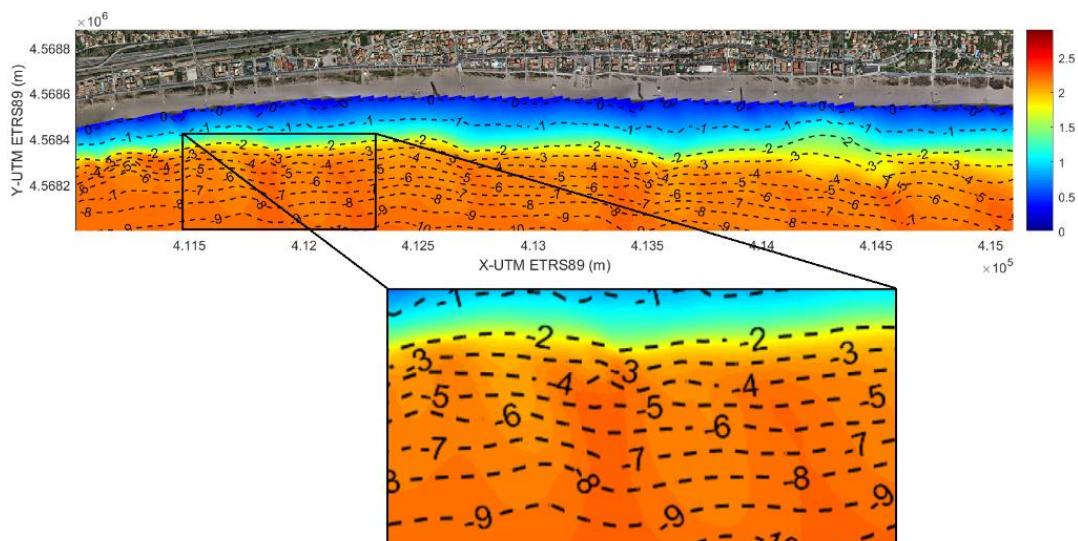


Figura 78. Aparición de gradientes longitudinales de altura de ola ($Dir=SE$, $T_R=25$ años, $SNM=0,88$ m).

4.4.3. ANÁLISIS MORFOLÓGICO

Las Figuras 68 a 74 muestran la respuesta morfodinámica de la playa en términos de zonas potenciales de sufrir inundación, erosión y acumulación de sedimento como consecuencia del temporal ($t=6h$), considerando el estado actual de la playa (Figura 68), una extracción a lo largo de una zanja de 40 cm (Figuras 69, 70 y 71), otra zanja de 70 cm (Figuras 72, 73 y 74) y un retroceso de la línea de orilla hasta la posición que ocupaba en el año 2004 (Figuras 75, 76 y 77).

- Situación actual

Los resultados muestran como el nivel del mar combinado con el efecto de la marea astronómica y meteorológica causan una disminución de la anchura a lo largo de toda la playa. Se puede apreciar que, entre las curvas de nivel de 0 m, que define la línea de orilla, y la de 1 m, es donde se sitúa el límite de la inundación. El remonte del oleaje asociado con las tormentas consideradas es prácticamente inapreciable dado el comportamiento disipativo de la playa.

En cuanto a los resultados que muestran la erosión y la acumulación de sedimento, se aprecia una clara predominancia del transporte transversal y el mecanismo de defensa natural que tienen este tipo de playas: erosión a lo largo de zona de rompientes y de la zona de la playa emergida afectada por la inundación, y la formación una barra longitudinal en la playa sumergida, cuyo objetivo es que las olas rompan más lejos de la orilla, y de una berma en la playa emergida, el objetivo de la cual es disminuir el impacto del oleaje y de la sobre elevación del nivel del mar.

La cantidad de sedimento erosionado está estrictamente relacionado con la intensidad de la tormenta. Queda reflejado en las figuras que, a medida que se consideran periodos de retorno mayores, la intensidad de la erosión y de la acumulación de sedimento se incrementa en tamaño de la zona afectada y volumen de sedimento movilizado.

Además, en todos los casos considerados siempre hay una zona de la playa en la que la respuesta morfológica es más intensa que en otras zonas: la zona cercana al Port Ginesta, en el límite oeste de la actuación (Figura 79). Consultando los valores de la topografía en esta zona, se comprueba que el nivel de elevaciones es inferior al que se puede encontrar en la zona opuesta del tramo de playa de interés. Esto es debido a que anteriormente en la zona se ubicaban humedales y a la desecación sistemática de los mismos realizada desde la Ley Cambó de 1918, que eliminó espacios de transición entre el mar y el territorio continental y zonas de dunas. Aún hasta 1936 la desecación de los humedales se realizó de forma sistemática, tanto por cuestiones de insalubridad como de aprovechamiento agrícola, sobre todo en el caso del Delta del Llobregat, como de urbanización, como es el caso de les Botigues de Sitges o zonas de Castelldefels. Tal interés en desecar humedales quedaba reflejado en que el gobierno español cedía la propiedad del suelo desecado a los promotores privados que realizasen los trabajos necesarios para ello, o que en el Plan de Obras Públicas de Victoriano Muñoz del 1936 había un programa de desecación de todos los humedales de Cataluña. Por consiguiente, esta zona es más susceptible de experimentar un impacto mayor una vez se realicen las extracciones de arena.

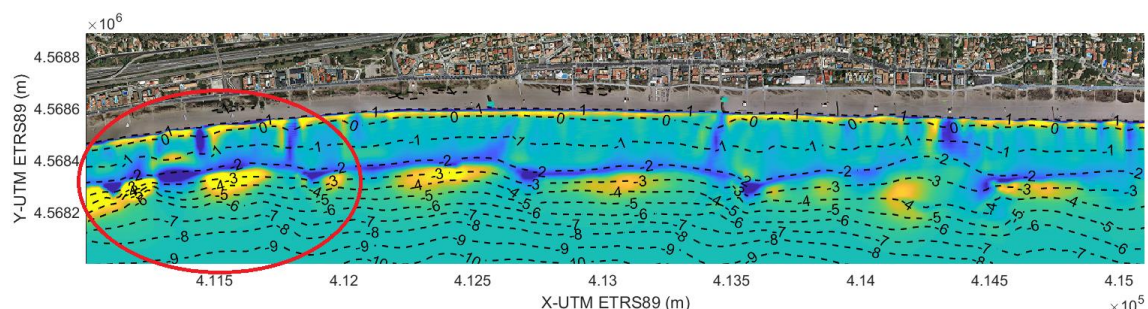


Figura 79. Zona que sufre mayor impacto bajo la acción del oleaje ($Dir=SE$, $T_R=25$ años, $SNM=0,88$ m).

En cuanto a los perfiles de playa obtenidos se aprecia la formación de la berma, que tiene unas mayores dimensiones en la zona Oeste de la playa, y la inexistencia de zonas anegadas por el mar. La respuesta obtenida es prácticamente idéntica para todas las tormentas consideradas y pone de manifiesto que la playa responde adecuadamente a la acción de los temporales. Por tanto, en las condiciones actuales, bajo la acción del oleaje en eventos extremos y la disminución de la anchura provocada por una sobreelevación del nivel del mar no se incrementa la vulnerabilidad de la playa. En las secciones también se puede comprobar la diferencia de cota entre los dos extremos opuestos del tramo de playa en cuestión mencionado anteriormente.

Finalmente, otro aspecto que cabe destacar es la aparición de corrientes de retorno (*rip-currents*) (Figura 80). Estas corrientes están provocadas por los gradientes de altura de ola apreciados en el capítulo anterior. El agua que se acumula en la orilla busca regresar al mar por el camino de menor resistencia, creándose un canal que devuelve al agua mar adentro. Suelen ser más fuertes cuanto peor es el temporal, por ello la magnitud de la erosión asociada aumenta a medida que la altura de ola de la tormenta es mayor.

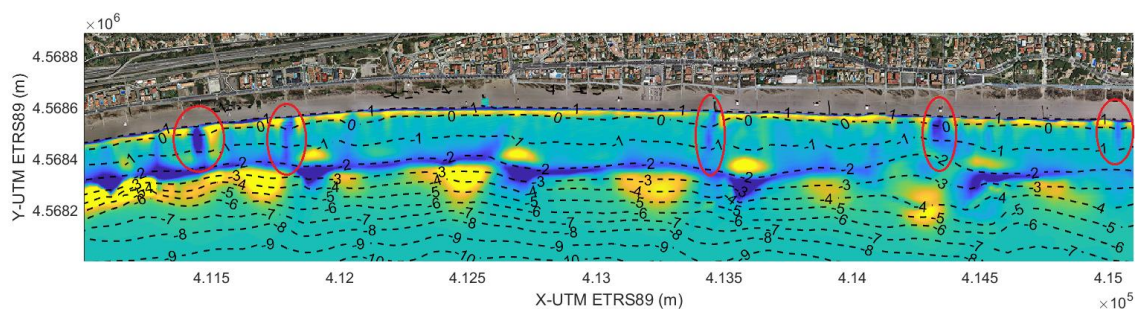


Figura 80. Aparición de corrientes de retorno ($Dir=SE$, $TR=25$ años y $SNM=0,88$ m).

- Método de extracción "A": Zanja de 40 cm.

En base a los resultados obtenidos para los diferentes eventos extremos, se observan varias diferencias en la respuesta de la playa una vez realizada la zanja de 40 cm.

La principal diferencia es que ahora sí aparecen zonas emergidas de la playa que quedan bajo el agua más allá de la sobreelevación del nivel del mar establecida, aunque dichas zonas inundadas se observan únicamente cuando se considera el escenario III de sobreelevación de nivel del mar. Para el resto de las sobreelevaciones consideradas, la playa no sufre ninguna inundación. Ello indica que la franja de seguridad de 15 m es capaz de aguantar sobreelevaciones de nivel del mar que llegan hasta los 0,40 m.

Todas las zonas inundadas se ubican en la región Oeste de la playa, cerca del Port Ginesta, lugar que, tal y como se ha comentado anteriormente, era el más susceptible de sufrir las consecuencias de la extracción.

En tormentas procedentes del Sur, del Sureste y del Sur-Sureste, la región inundada queda limitada por el lugar donde se ha realizado la zanja, formando embalses independientes entre ellos. Finalmente, cuando la altura de ola es mayor (tormentas del SSW) es cuando se producen las inundaciones más importantes, que llegan incluso a anegar parte de la zona donde se encuentran las dunas. Esta inundación tiene un gran impacto en el ecosistema de la playa, ya que puede llegar a provocar que la vegetación desaparezca por culpa del ahogamiento de las diferentes especies.

También se debe destacar que en tormentas procedentes del Sur-Suroeste se aprecia un nuevo proceso, el *overwash*, que abre un canal de conexión entre el mar y el lugar de extracción de arena afectado por la inundación (Figura 81). Éste es uno de los peores procesos que se puede producir, ya que establece un intercambio continuo de flujo con una zona que no debería quedar expuesta a la entrada de agua.

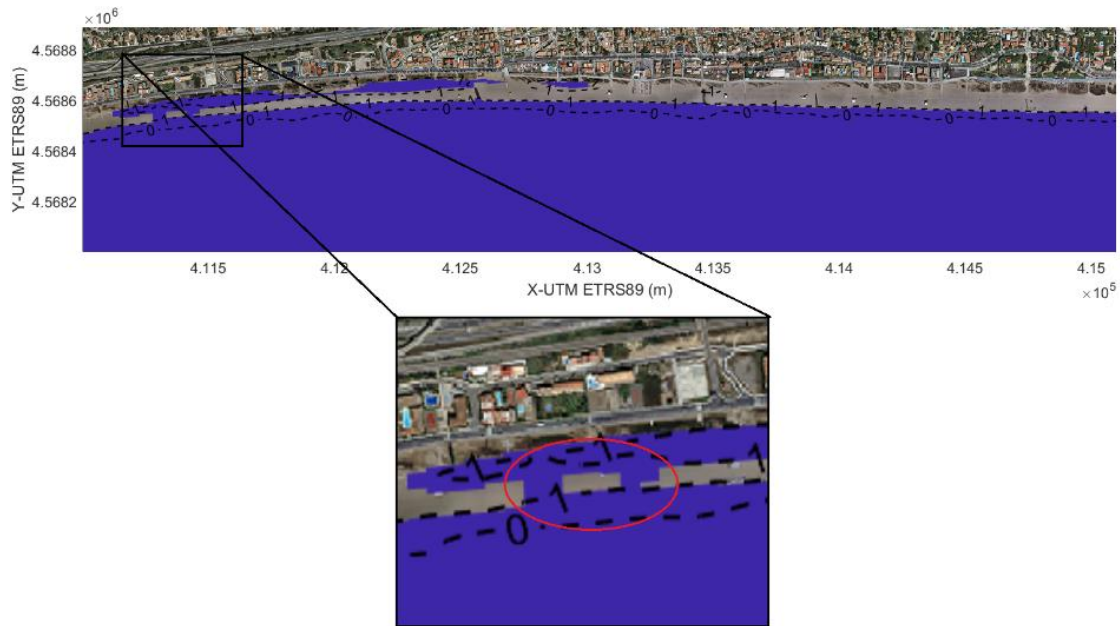


Figura 81. Corrientes de overwash en tormentas procedentes del SSW, $T_R=25$ años y $SNM=0,88$ m.

Analizando las figuras que muestran el patrón de acumulación/erosión, se observa el mismo patrón de respuesta descrito en la situación actual de la playa. Adicionalmente, en tormentas procedente del Sur-Suroeste se puede observar la deposición de arena en la zona de la playa emergida afectada por la inundación producida por el overwash, proceso conocido como *washover*. Aprovechando las corrientes de overwash, esta es la manera natural que tiene la playa de volver a depositar arena en el lugar en el que se había realizado la extracción (Figura 82).

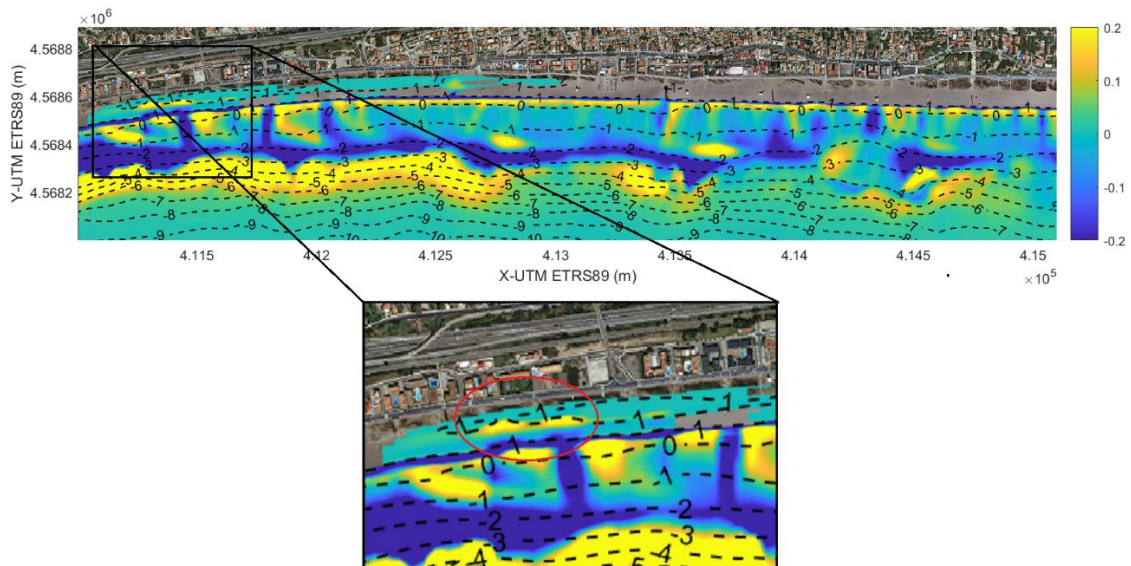


Figura 82. Deposición de arena en la zona de extracción producida por el washover en tormentas procedentes del SSW, $T_R=25$ años y $SNM=0,88$ m.

Las diferencias en términos de erosión y acumulación respecto a la situación actual muestran un comportamiento prácticamente idéntico en tormentas procedentes del SE. En cambio, se observa un ligero incremento en la magnitud del transporte de sedimento, tanto en la playa emergida como en la sumergida en tormentas procedentes del S y del SSE. Finalmente, las tasas de transporte de sedimento son muy superiores en tormentas procedentes del SSW, dada su mayor altura de ola. Las diferencias más significativas se observan, en todos los casos, en el tramo Oeste de la playa, debido a su mayor vulnerabilidad.

Los perfiles de playa muestran la situación descrita en este caso. Se observa un tramo de la playa bajo el agua y la formación de una berma de mayores dimensiones en la zona Oeste de la playa. En cambio, en el tramo Este no se observa inundación alguna y la berma es de menor tamaño.

La respuesta morfológica con cambios más significativos respecto la situación inicial, como era de esperar, se aprecia con la tormenta procedente del SSW.

- Método de extracción "B": Zanja de 70 cm

Los resultados obtenidos después de extraer arena realizando una zanja de 70 cm a lo largo del Tramo 1 de la playa de Castelldefels muestran una situación todavía peor a la que se ha visto con la zanja anterior cuando se tiene en cuenta el escenario III de sobreelevación del nivel del mar. La zona inundada pasa a ser más extensa en todo el extremo Oeste de la playa y las corrientes de *overwash* aumentan en número y tamaño. Además, en tormentas procedentes del SSW estas zonas se agrandan de tal manera que la playa seca queda totalmente anegada por el agua, exceptuando un pequeño tramo de la franja de 15 m que se había dejado como medida de seguridad. También se puede ver como, en este caso, nuevos sectores de la playa han quedado bajo el agua, ahora en el tramo central (Figura 83).

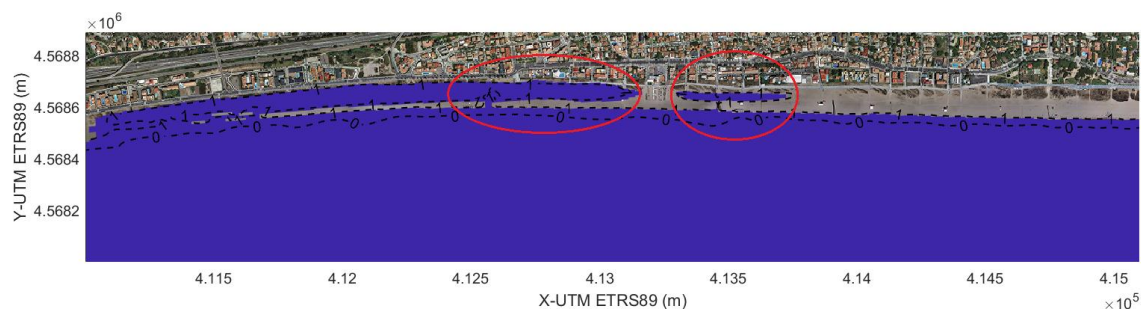


Figura 83. Aparición de nuevas zonas que han quedado inundadas en tormentas procedentes del SSW, $T_R=25$ años y $SNM=0,88$ m.

En la Figura 83 también se puede ver que en el tramo Oeste de la playa la inundación llega hasta el paseo marítimo. Es importante recordar que la acción de olas individuales no viene representada por el modelo. Por tanto, se debe tener en cuenta que alguna ola en particular podría llegar a sobrepasar el paseo marítimo y alcanzar la zona urbanizada, pudiendo ocasionar daños graves.

En base a los resultados que muestran el transporte de sedimento, se observa el mismo tipo de comportamiento que en los casos anteriores. El cambio más significativo se encuentra en el sedimento depositado por el *washover*. Al incrementar el número de corrientes de *overwash*, mayor es la cantidad de sedimento devuelta al lugar de extracción.

En este caso, las diferencias en términos de transporte de sedimento respecto la situación inicial muestran unas magnitudes inferiores que en el caso anterior. Al producirse una inundación tan importante, la playa no ha tenido margen de respuesta para formar barras de protección de mayor tamaño. De este modo, las diferencias que se observan con una zanja de 70 cm son prácticamente inapreciables en tormentas procedentes del S, del SE y del SSE, y más significativas en tormentas del SSW. Las diferencias de mayor intensidad se ubican de nuevo en el tramo Oeste de la playa.

En cuanto a los perfiles obtenidos, se observa como la playa queda totalmente bajo el nivel del mar en el tramo Oeste. En cambio, el tramo Este responde adecuadamente, sin inundarse, dado que las barras de sedimento y la mayor cota de la playa emergida realizan la función de protección en perfectas condiciones.

- Método de extracción “C”: Retroceso de la línea de orilla.

Este caso es el único en el que la respuesta es muy parecida a la situación actual. La suave pendiente que se ha dejado en el momento de realizar la extracción, combinada con la gran anchura que la playa sigue conservando y con el hecho de que no se ha rebajado el nivel actual, garantizan la función de protección.

La playa en el año 2004 ya era capaz de ofrecer una buena respuesta frente a los temporales y al volver a unas condiciones prácticamente idénticas, su función de protección no ha variado.

Todos los perfiles de playa obtenidos confirman que no existe inundación a lo largo del tramo donde se ha llevado a cabo el retroceso de la línea de orilla.

La única diferencia considerable que se puede apreciar es el retroceso de la berma respecto a la situación actual. En cambio, mar adentro, para las direcciones de procedencia S, SE y SSE no se observan cambios significativos en términos de erosión y acumulación. Por el contrario, si se considera una tormenta procedente del SSW, sí que se puede ver una mayor respuesta, sobre todo en el tramo central.

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El principal objetivo de este estudio ha sido evaluar la cantidad de sedimento disponible de la zona emergida de una playa en la celda litoral Port Ginesta – Puerto de Barcelona, para ser reutilizado como medida de protección costera sin menoscabo de la función de protección frente a temporales.

Se ha realizado un análisis histórico de la evolución de la costa que ha permitido determinar la zona de extracción dentro de la celda litoral. A continuación, se ha implementado un modelo numérico hidro-morfodinámico en 2D (XBeach), que ha permitido evaluar la inundación costera y los patrones de erosión/sedimentación frente la acción combinada de temporales con un período de retorno de 1, 5 y 25 años y nivel medio del mar de 0 m, 0,40 m y 0,88 m. Finalmente, se ha evaluado la respuesta de la playa frente a estos episodios de alta energía para tres patrones de extracción de arena: (i) una zanja de 40 cm entre la zona delimitada por las dunas y un límite situado a 15 m de la línea de orilla, (ii) una zanja de 70 cm entre la zona delimitada por las dunas y un límite situado a 15 m de la línea de orilla y (iii) un retroceso de la línea de orilla a la posición que ocupaba en el 2004. La primera alternativa permitiría extraer 105.000 m³ a lo largo de todo el ámbito de estudio, la segunda 183.750 m³ y la tercera 36.750 m³.

Los resultados de la evolución histórica de la línea de orilla a lo largo del período 2004 – 2017 muestran que, en el peor de los casos, las playas de El Prat, Viladecans y Gavá han perdido anchura a un ritmo medio de 3,34 m/año, 2,62 m/año y 0,75 m/año, respectivamente. Por otro lado, la playa de Les Botigues de Sitges se ha mantenido en equilibrio. En cambio, la playa de Castelldefels es la única que muestra un comportamiento evolutivo de acreción durante todos los años considerados, siendo la tasa media de avance de la línea de orilla de 2,03 m/año. Por tanto, Castelldefels es el lugar seleccionado donde realizar la extracción de arena. Con tal de minimizar los posibles efectos de las alternativas de extracción se impone una tasa evolutiva de la línea de orilla superior a 1,5 m/año, lo que resulta en un tramo potencial de fuente de sedimento de unos 3.500 m (entre las calles Uruguay y Calle 13).

De forma general, el comportamiento morfodinámico frente a la acción de temporales muestra que, en las condiciones actuales la zona de extracción seleccionada de la playa de Castelldefels protege con gran holgura la zona urbanizada situada tras ella para los distintos eventos extremos analizados. Al tratarse de una playa con un tamaño de sedimento fino, el oleaje rompe lejos de la orilla generándose una zona de surf muy amplia típica de playas disipativas en las que la energía del oleaje disminuye de forma progresiva a medida que se aproxima a la costa, no ocasionando inundación alguna más allá de la provocada por la sobreelevación del nivel del mar.

Los patrones de erosión/acumulación indican una clara predominancia del transporte transversal con una erosión del sedimento cerca de la costa y una acumulación en forma de berma en la playa emergida y especialmente como barra de arena longitudinal a la playa en la zona sumergida.

El tramo de costa más cercano al Port Ginesta es el más susceptible de sufrir los efectos derivados de la extracción de arena. Este comportamiento local se explica por la menor cota emergida del tramo en comparación con el resto de la celda y es donde se observan las erosiones y acumulaciones más intensas.

En el caso de extracción mediante una zanja de 40 cm, los resultados indican que algunos sectores en la región Oeste de la playa quedan anegados por el agua. A medida que se consideran tormentas de mayor altura de ola, el área afectada por la inundación aumenta. Las dunas llegan a proteger el paseo marítimo de la inundación, que queda concentrada en la zona en la que se ha rebajado el nivel, excepto para tormentas procedentes del SSW. En este caso, la región inundada se extiende cubriendo gran parte de las dunas. Esta inundación tiene un gran

impacto en el ecosistema de la playa, ya que puede provocar que la vegetación desaparezca por culpa del ahogamiento de las diferentes especies. Además, se aprecia la aparición de corrientes *overwash*. Estas corrientes consisten en el flujo de agua y sedimento por encima de la berma durante las tormentas, desde mar adentro a la zona de la playa que queda inundada.

Por otro lado, el tramo central y la región Este, al tener una mayor elevación, no sufren ninguno de los problemas mencionados anteriormente y siguen ejerciendo la función de protección en perfectas condiciones.

La respuesta morfológica obtenida con una zanja de 70 cm augura una situación todavía peor a la descrita anteriormente. La región Oeste de la playa queda completamente anegada bajo el mar, incluyendo gran parte de las dunas de todo el tramo. A su vez, la inundación alcanza prácticamente el paseo marítimo y por primera vez parte del tramo central. Por otro lado, la región Este sigue ofreciendo una buena respuesta, aunque se aprecia un aumento en el transporte transversal de sedimento.

Es importante destacar que el modelo utilizado considera el oleaje de forma *inter-wave*, es decir, integrando todo el tren de oleaje a través de unos parámetros representativos (como por ejemplo la altura de ola significativa H_s), de modo que, si bien el efecto local queda parcialmente reflejado, no se simula el comportamiento de las distintas olas individuales. Por tanto, no debe descartarse que alguna ola en concreto llegue a sobrepasar el paseo marítimo y provoque daños al mobiliario urbano, ponga en riesgo la seguridad de las personas que se encuentren en los alrededores o dificulte la circulación de los vehículos.

Finalmente, los resultados muestran que realizando un retroceso de la línea de orilla la respuesta de la playa es prácticamente idéntica a la situación actual. Con la anchura y las características que tenía la playa en 2004 ya era capaz de resistir los temporales. Durante estos años la acumulación de sedimento ha permitido disponer de más anchura para dar cabida a los bañistas y otros equipamientos.

En conclusión, si se adopta la solución consistente en una zanja de 40 cm, el tramo disponible para la extracción se reduce a 2/3 de la longitud inicialmente seleccionada, ya que el tramo más cercano al Port Ginesta se inundaría durante los temporales. Dejando un margen de seguridad de 100 m respecto la región inundable, la extracción se realizaría a lo largo un tramo de longitud igual a 1.950 m, obteniendo así un volumen de arena disponible igual a 58.500 m³. En el caso de la alternativa consistente en una zanja de 70 cm y respetando el mismo margen de seguridad, el sedimento disponible se extraería a lo largo de 1/3 de la longitud inicialmente propuesta, que vienen a ser 1.255 m y el volumen de arena utilizable estaría entorno a los 66.000 m³. Finalmente, el sedimento disponible obtenido a partir de un retroceso de la línea de orilla hasta la posición ocupada en el año 2004 rondaría los 36.750 m³.

Comparando el volumen de arena disponible en el caso más favorable (zanja de 70 cm) con los volúmenes de varios de los trabajos de trasvase de arena realizados en el litoral español (Tabla 1), se observa que de los 16 casos expuestos, la playa de Castelldefels sería capaz de prestar su arena a todos ellos menos uno, incluyendo por ejemplo la gran mayoría de las playas de la ciudad de Málaga. Por tanto, se pone de manifiesto lo importante que es para la gestión costera conocer bancos de arena disponible para ser traspasados a otras playas.

Por consiguiente, a partir de este trabajo se ha comprobado que, dadas las condiciones hidrodinámicas de la celda litoral Port Ginesta – Puerto de Barcelona, existe arena disponible en la playa de Castelldefels que puede utilizarse para combatir los efectos de la erosión a corto y medio plazo en otra playa dentro de la misma celda litoral. Los modelos implementados han reproducido adecuadamente la respuesta morfológica de la playa, ya que han considerado la influencia local de la batimetría y han simulado la complejidad de los procesos que ocurren en las regiones costeras.

Con estos resultados, se demuestra la factibilidad del uso del trasvase de arena entre playas como medida de gestión costera. Se deben promover las soluciones para paliar los efectos de la regresión del litoral que lo entiendan como un sistema a escala de celda litoral o superior, y acabar así con el tradicional enfoque que priorizaba medidas a escala local, sin considerar las interacciones con las playas adyacentes. También podrían potenciarse estos trasvases frente a otras alternativas como el uso de sedimento del fondo mar, que la mayoría de las veces no tiene la granulometría adecuada y, en consecuencia, no ofrece la respuesta esperada. Estas técnicas han quedado en evidencia a lo largo de los años y han supuesto una gran pérdida de dinero público. Por un lado, se ha visto que no han podido frenar por completo la erosión ni a escalas temporales pequeñas y, por el otro, el sedimento no reunía las características necesarias para permanecer en la playa. Con el trasvase de arena entre playas de condiciones similares, el problema de la erosión quedaría solucionado a corto/medio plazo y el sedimento se adaptaría mejor a la nueva ubicación al haber sido extraído de un lugar con las mismas características.

6. FUTUROS CAMPOS DE INVESTIGACIÓN

En el siguiente capítulo se expone un futuro campo de investigación en base a la metodología y los resultados obtenidos en el presente estudio.

El transporte longitudinal de sedimento a lo largo del litoral juega un rol fundamental en la evolución de la costa. Dicho transporte se produce porque el oleaje incide en un ángulo oblicuo respecto a la orilla y su magnitud depende de los diferentes procesos que se han visto en este estudio que ocurren en las regiones costeras.

En la literatura se pueden encontrar numerosos cálculos que toman en consideración los factores que producen el transporte de sedimento en la zona de rotura, como puede ser la formulación del CERC (1984), de Kamphuis (1991) o de Van Rijn (2001), entre otros.

La arena disponible en la playa de Castelldefels que puede ser utilizada como medida de gestión costera se depositará en otra playa de la misma célula litoral para combatir la erosión a corto/medio plazo. El trasvase de arena no es una solución a largo plazo ya que la erosión provocada por el oleaje, las tormentas y las variaciones del nivel del mar no desaparecerán después de realizar esta actuación. Por tanto, esta medida puede proteger la costa durante el tiempo que dure la arena en la playa de destino, pero después de un cierto período de tiempo, la playa deberá ser alimentada de nuevo.

Hoy en día se desconoce el tiempo necesario para que un ecosistema de playas que configuran una celda litoral se recupere de un episodio de trasvase de arena de una sola playa, a pesar de que la arena de relleno es del tamaño y tipo adecuados. Es decir, no se tiene conocimiento del tiempo que necesitará la playa de Castelldefels para recuperar el sedimento que se le ha extraído.

Se ha visto en el presente estudio que sea cual sea la playa de destino, el sedimento regresará a la playa de Castelldefels gracias a la deriva litoral existente en la celda. Conocer el tiempo necesario para ello forma parte de un estudio más extenso, en el que el análisis de la interacción de factores como la capacidad de adaptación del sedimento en el nuevo ámbito, la hidrodinámica de la región costera en cuestión y las diversas formulaciones del transporte de sedimento juegan un factor clave. Además, existen numerosas alteraciones dentro del sistema costero que pueden afectar a la distribución y el impacto de la deriva litoral. Algunas de estas alteraciones son, por ejemplo, los cambios en la hidrodinámica o la intervención humana mediante la implantación de estructuras como puertos, presas, espigones o diques exentos.

Una vez conocido el tiempo necesario para la recuperación de la playa de préstamo, aumentaría la importancia del trasvase de arena entre playas y se podrían diseñar políticas de gestión costera que tengan en cuenta la frecuencia con la que debería realizarse el trasvase de arena.

BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Plan Estratégico Litoral (2006). *Síntesis de diagnosis y estrategias sobre la dinámica litoral y las playas del litoral metropolitano de Barcelona*. Plan Estratégico para el Litoral de la región de Barcelona.
- Bart, L. (2017). Long-term modelling with XBeach: combining stationary and surfbeat mode in an integrated approach. Delft University of Technology.
- Battjes, J. A. (1994). Shallow water wave modelling. Vancouver, University of British Columbia: Proc.Int. Symp.: Waves – Physical and Numerical Modeling, eds. M. Isaacson and M. Quick.
- Bezzi, A. (2009). *Beach Nourishment and Foredune Restoration: Practices and Constraints along the Venetian Shoreline, Italy*. Journal of Coastal Research. 56, 287-291.
- Bird, E., (2002). *Coastal Geomorphology. An Introduction*, 1st edition. John Wiley & Sons, LTD, England, 322 pp.
- Boletín informativo de Sener (2002). *Servicio de dragados para la costa catalana*. Nº25.
- Boak, E.H. y I.L. Turner. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 21(4): 688–703.
- Booij, N y Holthuijsen, L.H. (1987). *Propagation of ocean waves in discrete spectral wave models*. J. Comput. Physics, 68, pp.307326.
- Booij, N., Ris, R.C. y Holthuijsen, L.H., (1999). A thirdgeneration wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, J.Geoph.Research, 104, C4, pp.76497666.
- Bruun, P. (1954). *Coast erosion and the development of beach profiles*. Beach Erosion Board, Technical Memorandum, Nº 44.
- Byrnes, M. y Anders, F.J. (1991). *Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs*. Shore and Beach, 59(1), 17-26.
- Cavaleri, L. y Rizzoli, P.M., 1981. Wind wave prediction in Shallow water theory and applications. J.Geoph.Res., 8b, CII:pp.1096110973.
- Chiva, L., Pagán, J., López, I., Tenza-Abril, A.J., Aragonés, L. Sánchez, I. (2018). *The effects of sediment used in beach nourishment: Study case El Portet de Moraira beach*. Science of the Total Environment, 628-629, 64-73.
- Coastal Engineering Research Center (1984) Shore Protection Manual (SPM). USACE, U.S. Army Coastal Engineering Research Center.
- Collins, J.I., 1972. Prediction of shallow water spectra, J. Geophys. Res., 77, No. 15, pp.26932707.
- Donnelly, C. (2008). Coastal Overwash: Processes and Modelling. Lund: Lund University Publications.
- Eldeberky, Y. y Battjes, J.A., 1996. Spectral modelling of wave breaking: Application to Boussinesq equations, J. Geophys. Res., 101, No. C1, pp. 12531264.
- Elsayed, M. y Oumeraci, H. (2016). Combined Modelling of Coastal Barrier Breaching and Induced Flood Propagation Using XBeach. Division of Hydromechanics and Coastal Engineering, Leichtweiß Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources.

- Ferguson, P. (2011). Shingle recycling at Hurst Spit. New Forest District Council.
- Fraile Jurado, P. y Ojeda Zujar, P. (2012). The importance of the vertical accuracy of digital elevation models in gauging inundation by sea level rise along the Valdelagrana beach and marshes (Bay of Cádiz, SW Spain). *Geo-Marine Letters*, 33(2): 225-230.
- Hashimoto, N., Tsuruya, H. y Nakagawa, Y., 1998. Numerical computations of the nonlinear energy transfer of gravitywavespectra in finite water depths, *Coastal Engng. J.*, 40, pp.2340.
- Hanson, H. y Brampton, A. (2002). Beach nourishment projects, practices, and objectives – a European overview. *Coastal Engineering*, 47, 81-111.
- Holthuijsen, L., Booij, N. y Ris, R.C. (1996). The SWAN model for shallow water. *Coastal Engineering*. 53.
- Homar, A. (2010). Evaluation of the longshore sediment transport capacity at the Catalan coast. Departament d'Enginyeria Hidraulica, Marítima i Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- Hoonhout, B. (2015). XBeach user manual.
- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (2017). *Datos Lidar*
- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (2017). *World Map Service – Ortofotos històriques de Catalunya*.
- Inman, D.L., Elwany, M. H. y Jenkins, S. A. (1993). Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches. *Journal of Geophysical Research*, 98(c10): 18181-18199.
- Jiménez, J.A. (2015). Transporte Longitudinal. Laboratorio de Ingeniería Marítima. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- Kofoed, J.P., Frigaard, P. and Kramer, M. Recent Developments of Wave Energy Utilization in Denmark.
- Department of Civil Engineering, Aalborg University (Denmark), 2006.
- Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and P.A.E.M. Janssen. Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge University Press, 1994.
- Laboratorio de Ingeniería Marítima (2015). Efectes del canvi climàtic al litoral de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- Laboratorio de Ingeniería Marítima (2008). Estat de la zona costanera a Catalunya. Volum I. Aspectes metodològics. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- Lynn, A. (2002). Sediment Recycling: Marsh Renourishment Through Dredged Material Disposal. Department of Earth Sciences. University of North Carolina at Wilmington.
- Nielsen, P., & Hanslow, D. (1991). Wave Run-Up Distributions on Natural Beaches. *Journal of Coastal Research*(7), 1139-1152.
- París, C. y Wibbelink, H. (1995). Construcción de playas. Experiencias en España. Ingeniería del Agua. Vol. 2.
- Puertos del Estado. Ministerio de Fomento. (2017). Clima medio de oleaje. Boya de Barcelona II. Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado.

- Puertos del Estado. Ministerio de Fomento (2017). Extremos máximos de oleaje por direcciones (altura significativa). Boya de Barcelona. Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado.
- Puertos del Estado. Ministerio de Fomento (2016). Redmar: Red de mareógrafos de Puertos del Estado. Informe Anual 2016. Área de Medio Físico de Puertos del Estado.
- Puertos del Estado. Ministerio de Fomento (2004). Resumen de parámetros relacionados con el nivel del mar y la marea que afectan a las condiciones de diseño y explotación portuaria. Puerto de Barcelona. Área de Medio Físico de Puertos del Estado.
- Reniers, A., Roelvink, J., & Thornton, E. (2004). Morphodynamic modelling of an embayed beach under wave group forcing. *Journal of Geophysical Research*, 109.
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*(56), 1133-1152.
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., & McCall, R. (2010). XBeach Model Description and Manual. Delft: Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.
- Sánchez-Arcilla, A. (1994). Ingeniería de playas (I): conceptos de morfología costera. *Ingeniería del Agua*, 1(2): 98-114.
- Karasu, S., Paul, A., Uzlu, E., Kankal, M., Yüskek, O. (2016). *Beach nourishment alternative assessment to constrain cross-shore and longshore sediment transport*. *Applied Ocean Research*, 59, 459-471.
- Shilong, L., Liu, Y., Jin, R., Zhang, J., Wei Wei, (2016). *A guide to coastal management: Benefits and lessons learned of beach nourishment practices in China over the past two decades*. *Ocean and Coastal Management*, 134, 207-215.
- Stive, M. J., & De Vriend, H. J. (1994). Shear stresses and mean flow in shoaling and breaking waves. *Proceedings 24th International Conference on Coastal Engineering*, 594–608.
- SWAN team. SWAN user manual, SWAN Cycle III version 40.51. Pp 3-24, Delft, 2006.
- Thomas, I. (2012). Beach Recycling. Pevensey Bay Sea Defences. SCOPAC/SCG Sediment Recycling Workshop.
- Vidal, C., Losada, M.A., Medina, R. y Losada, L. (1995). Modelos morfodinámicos de las playas. *Ingeniería del Agua*, 2, 55-74.

ANEXOS

- ANEXO 1. REPORTAJE FOTOGRÁFICO
- ANEXO 2. RECOPIACIÓN DE LOS RESULTADOS HIDRODINÁMICOS
- ANEXO 3. RECOPIACIÓN DE LOS RESULTADOS MORFOLÓGICOS